

面向精密光谱的频率离散窄线宽半导体激光产生技术*

闫晓娟¹⁾³⁾ 黄新成²⁾³⁾ 张梓浩²⁾³⁾ 程子伟²⁾³⁾ 周晓彬¹⁾³⁾
杨家琪¹⁾³⁾ 赵刚^{2)3)†} 马维光^{2)3)‡}

1) (山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

2) (山西大学, 激光光谱研究所, 量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2025年11月13日收到; 2026年1月12日收到修改稿)

针对高精度激光光谱技术对窄线宽与高频率定标精度的双重需求, 本文提出一种基于光学反馈的频率离散窄线宽半导体激光器方案. 该方案基于光学反馈将半导体激光器频率锁定于高精度光学超稳腔, 并结合电流扫描, 实现了频率以腔自由光谱范围为步长的阶跃式激光输出. 实验测得激光线宽由自由运转时的 1.31 MHz 被压窄到 3.93 kHz. 在周期性扫描中, 绝对频率重复性平均标准差优于 1.69 MHz. 在锁定条件下, 激光长期频率漂移控制在 17.27 MHz/24 h. 该激光器兼具光频梳的频率标定能力与传统扫描激光的简易探测优势, 即其离散频率阶跃为光谱测量提供了精确的横轴标尺, 而时域串行输出模式仅需单点探测器即可完成探测, 显著降低了系统复杂度与成本. 本研究为低成本、易集成的高灵敏度光谱传感系统提供了极具前景的光源解决方案.

关键词: 光学反馈锁定, 线宽压窄, 频率阶跃输出

DOI: 10.7498/aps.75.20251552

CSTR: 32037.14.aps.75.20251552

1 引言

近年来, 痕量气体检测在矿井、电力、化工、能源、医疗、环境监测等领域都有重要的应用价值, 而激光光谱技术以其高灵敏度、高分辨率、无侵入性、无需样品预处理、可实时动态响应的特点在上述领域获得广泛的应用^[1-5]. 在精密激光光谱技术中, 测量性能的核心取决于两大相互关联的要素: 一是频率定标精度, 即光谱横轴(频率/波长)的准确度, 它直接决定了被测物质特征谱线位置的可靠性; 二是探测灵敏度, 通常体现为光谱纵轴的信噪比.

在频率定标方面, 传统方法主要依赖于波长计

或法布里-珀罗标准具进行相对标定. 这类方法精度有限(通常为 MHz—百 MHz 量级), 且易受环境温度、压力波动的影响而产生漂移, 难以满足长期、重复性高的精确测量需求. 光频梳的出现为绝对频率定标带来了革命性突破, 其等间距的梳齿可作为天然的“光学尺”, 实现对光谱横轴的直接、精确标定. 然而, 光频梳系统成本高昂、结构复杂, 且其并行输出多频率的特性, 在探测端通常需要配合高分辨率光谱仪或傅里叶变换干涉仪等精密设备才能解析, 这进一步增加了系统的复杂度与成本, 限制了其在工业现场、便携设备等对成本与集成度敏感场景下的应用.

在探测灵敏度方面, 高精度光学谐振腔(如

* 国家重点研发计划(批准号: 2023YFF0714700)、国家自然科学基金(批准号: 62327813, 61905136, 62175139)、中央引导地方科技发展资金项目(批准号: YDZJSX2024D001)、山西省重点研发计划(批准号: 202302090301014)、山西省青年基金(批准号: 202403021222027)和山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(批准号: 20220001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gangzhao@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: mwg@sxu.edu.cn

用于腔增强吸收光谱或腔衰荡光谱) 可将有效光程显著提升至公里量级, 从而极大增强对微弱吸收的探测能力. 然而, 当腔的精细度超过 10^5 时, 其纵模线宽仅为 kHz 量级. 此时, 线宽大于 MHz 量级的激光器与腔的直接耦合效率极低, 仅有不足千分之一的光功率能有效激发腔模, 导致系统光能利用率、信噪比以及最终探测灵敏度均大幅下降, 因此, 发展可调谐的窄线宽光源成为推动高灵敏度光谱技术实用化的关键. 目前, 较为成熟的商用窄线宽光源如外腔半导体激光器 (ECDL) 和光纤激光器虽然线宽方面表现良好, 但成本高、体积大难以集成^[6,7]. 相比之下, 分布反馈 (DFB) 激光器与量子级联激光器 (QCL) 等半导体激光器在小体积、低成本与鲁棒性方面展现出显著优势^[8,9], 但由于其本征线宽同样在 MHz 量级, 因此进一步需在压窄激光线宽.

常用的线宽压窄技术是将激光器频率锁定到一个稳定的参考上, 主要分为 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁定与光学反馈锁定两种方式. PDH 技术通过相位调制边带产生误差信号, 利用电子伺服反馈将激光频率锁定在参考光学腔的谐振峰上, 能有效抑制频率噪声, 将线宽压窄至腔模线宽水平^[10-13]. 2021 年, 郭松杰等^[13] 利用 PDH 稳频技术产生误差信号, 通过双路反馈控制将 632.8 nm ECDL 激光器的线宽由自由运转状态下的 300 kHz 压窄到 10 kHz. 然而, PDH 技术反馈带宽通常较窄 (kHz 量级), 对环境低频扰动敏感, 且激光器的频率调谐必须通过扫描参考腔本身的谐振频率 (如驱动腔镜上的压电陶瓷) 来实现. 这导致其连续扫描范围和扫描速度受制于压电陶瓷的物理特性, 且在快速扫描时极易因伺服环路无法及时跟踪而失锁, 严重制约了测量速度与长期重复性. 而光学反馈锁定技术则展现出更优的鲁棒性与调谐灵活性. 该技术将部分输出激光注入到一个高精度的超稳腔中, 经过腔滤波后的窄带光被反馈回激光器内部. 在适当的反馈率下 (通常为 10^{-5} — 10^{-4}), 结合一个低带宽的电子伺服系统动态校正反馈光的相位, 激光器的振荡频率会被牵引并稳定在超稳腔的谐振频率上, 其频率噪声被极大抑制, 线宽可被压窄至腔模线宽以下^[14-21]. 2014 年 Fasci 等^[20] 通过光学反馈技术将一台 8.6 μm 波段的 QCL 激光器锁定到线宽为 27 kHz 的 V 型腔上, 在 1 ms 观察时间内激光线宽由 3.2 MHz 减小至 4 kHz, 实现了 29 dB 的线宽

压窄. 2024 年杨家齐等^[21] 基于线性 Fabry-Pérot 腔的光学反馈频率锁定技术方案, 在观测时间小于 10 ms 时将中红外 QCL 激光器压窄至 1.1 Hz. 该方法锁定范围宽 (可达百 MHz 量级), 且频率调谐可直接通过改变激光器的注入电流或工作温度来实现, 完全不受外部谐振腔机械扫描的限制, 为实现快速、宽范围的窄线宽输出奠定了基础.

基于成熟的光学反馈技术, 本文创新性地提出并实现了一种离散窄线宽激光产生方案. 该方案首先通过光学反馈将激光器的输出频率锁定在超稳腔的本征模式上, 压窄激光线宽到 kHz 量级. 随后在锁定条件下, 通过连续调谐激光器驱动电流, 能在百 GHz 范围内产生离散窄线宽激光. 该激光的输出在时域上是连续的, 但其输出频率以超稳腔的自由光谱范围 (FSR) 为步长, 进行精确量化的阶跃式调谐. 这一独特的工作机制使其兼具了两方面的核心优势. 在频率定标精度方面, 其频率阶跃间隔由超稳腔的 FSR 精确标定, 从而使得该激光器像光频梳一样为光谱横轴提供了一条高精度、高稳定性的“光学标尺”, 确保了测量的重复性与频率差精度; 在系统结构与探测方面, 它采用串行扫描方式, 在时域上依次输出不同频率的窄线宽激光, 使得其在探测端仅需一个低成本的单点光电探测器即可完成全部光谱信号的采集. 这彻底规避了光频梳所必需的、复杂且昂贵的高分辨率并行探测系统. 本方案的实行能在保证高灵敏度、高精度与高重复性的同时, 为实现低成本、小型化及易于集成的精密光谱传感系统提供了极具竞争力的光源解决方案.

2 实验原理

光反馈压窄激光线宽的原理如图 1 所示, 其中半导体激光器输出的激光耦合进光学谐振腔内并多次往返, 腔前镜 M_1 的直接反射光和从腔前镜 M_1 透射出来的谐振光一并原路反馈回激光器中. 光学谐振腔为两镜线性腔, 假设平面腔镜 M_1 和平

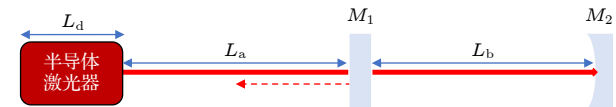


图 1 光学反馈压窄激光线宽原理图

Fig. 1. Principle diagram of laser linewidth narrowing by optical feedback.

凹腔镜 M_2 的振幅反射率均为 r , 两镜片间距为 L_b , 激光腔端面到平面镜 M_1 的距离为 L_a , 激光器内部 F-P 腔腔长为 L_d . 激光器在接受光反馈注入后输出的角频率 ω 为^[22-24]

$$\omega = \omega_{\text{free}} - K_1 \frac{\sin[\omega(\tau_a + \tau_b) + \theta] - r^2 \sin(\omega\tau_a + \theta)}{1 + F^2 \sin(\omega\tau_b/2)^2} + K_2 \sin(\omega\tau_a + \theta), \quad (1)$$

式中 ω_{free} 表示没有光学反馈时激光器自由运转的输出角频率; τ_a 为从激光腔出射端面到线型腔前镜 M_1 之间的单次往返时间; τ_b 为激光在线型腔内的往返时间; $\theta = \arctan(\alpha)$, α 为相位耦合系数; $F = 2r/(1 - r^2)$; K 为反馈光的权重因子, 具体可以表示为

$$K_1 = Kr/(1 - r^2), \quad K_2 = Kr, \\ K = \sqrt{1 + \alpha^2} \frac{c}{2nL_d} \sqrt{\beta} \frac{1 - r_0^2}{r_0}, \quad (2)$$

其中 $c/2nL_d$ 为半导体激光器的自由光谱范围, n 为激光器内部增益介质折射率, r_0 为激光器内部谐振腔端面振幅反射系数, β 为反馈率. (1) 式中的第 2 项和第 3 项分别代表谐振腔内泄漏光和直接反射光反馈对激光器输出角频率的影响, 当没有光学反馈时, 这两项的值都为零, 此时 $\omega = \omega_{\text{free}}$; 当存在光反馈时, 可以通过控制反馈相位, 使 (1) 式中的第 2 项和第 3 项在光学谐振腔谐振频率处同样为 0, 此时需要两个正弦项都为 0, 即 $\omega(\tau_a + \tau_b) + \theta = 2m\pi$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), 且 $\omega\tau_a + \theta = 2n\pi$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), 通过求解可以得到此时激光腔到平面镜 M_1 的距离 L_a 必须为谐振腔腔长 L_b 的整数倍. 在满足此相位条件的基础上, 对 (1) 式进行理论模拟, 得到的结果如图 2 所示, 其中横轴为自由运转的激光频率 ω_{free} , 纵轴为光学反馈下的激光器输出频率 ω , 且横轴的零点代表激光频率处于谐振腔的某个纵模频率. 图 2(a) 中蓝色曲线为没有直接反馈光 (即式中第 3 项为 0) 影响的结果, 红色曲线为有直接反馈光影响的结果. 可以看出, 直接反射光会在蓝色曲线上叠加一个正弦曲线, 但二者在腔纵模频率处的变化趋势是相同的. 这是因为在满足反馈相位条件时, 谐振场反馈光与激光器腔内光场同相叠加, 从而对激光频率产生有效牵引并实现锁定; 而直接反射光由于其反馈相位与谐振反馈光相差 π , 在锁频条件下与激光腔内光场相消, 无法对激光器产生有效光学反馈. 因此, 尽管两类反射

光在空间上共线返回激光器, 真正参与光学反馈并主导激光锁频行为的仅为超稳腔的谐振反馈, 而非腔前端面的直接反射光. 所以之后的分析将忽略直接反馈光的影响. 图 2(b) 为图 2(a) 腔纵模频率处的放大图, 当正向 (或反向) 扫描激光频率到接近腔纵模频率的 α (α') 点时, 激光输出频率会跳变至腔纵模频率 β (β') 点且保持锁定, 几乎不再跟随扫描电流变化直至 γ (γ') 点, 进一步扫描将超出锁定区域, 激光输出频率会从 γ (γ') 点跳变至 δ (δ') 点, 失去锁定. 图中红色虚线限定范围即为光学反馈的锁定范围, 在锁定情况下, 激光器线宽将被压窄到腔模线宽以下.

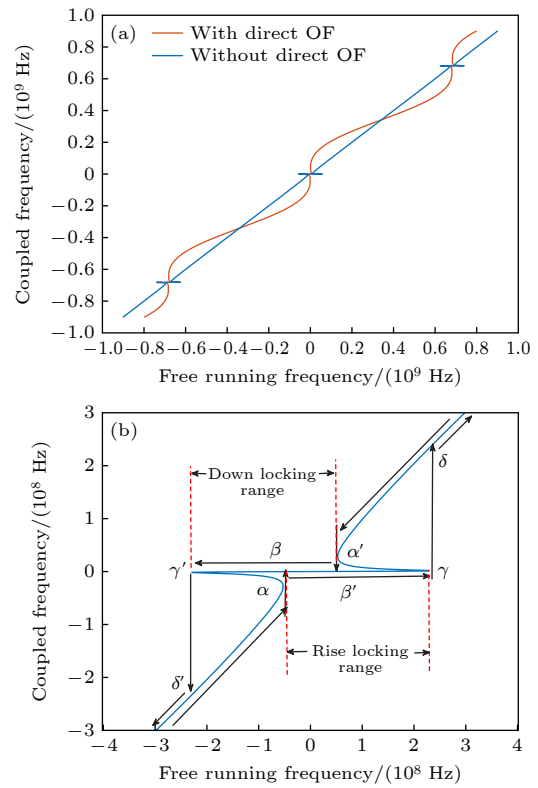


图 2 (a) 激光器输出频率 ω 随着自由运转的激光频率 ω_{free} 的变化; (b) 腔纵模频率处的激光频率变化细节
Fig. 2. (a) Output frequency ω of the laser varies with the free-running laser frequency ω_{free} ; (b) details of the laser frequency behavior at the cavity longitudinal mode frequency.

锁定范围的大小和对称性与反馈率和反馈相位有关. 图 3(a) 模拟了不同反馈率下锁定范围的变化. 可以看出, 弱反馈条件下, 锁定范围会随着反馈率的增大而增大, 这将增强系统的抗干扰性, 但是过大的反馈率会引起激光的模式跳变和非线性响应, 因此反馈率一般控制在 10^{-5} — 10^{-4} 之间.

图 3(b) 模拟了不同反馈相位对锁定的影响. 可以看出, 当反馈光相位为 $2\pi m$ (m 为正整数) 时, 如图中蓝线所示, 整体锁定范围左右对称, 腔模谐振频率 (图中蓝点) 位于中心, 当正向和反向扫描激光电流时, 反馈锁定区域大小相同; 当反馈光相位略小于 $2\pi m$ (图中为 $2\pi m - 0.2\pi$) 时, 如图中绿线所示, 整体锁定范围不再具有对称性, 而是向右侧偏移, 腔模谐振频率处 (图中绿点) 也向右偏移, 当正向扫描激光电流时, 锁定区域变大, 而反向扫描激光电流则锁定区域变小; 当反馈光相位略大于 $2\pi m$ (图中为 $2\pi m + 0.2\pi$) 时, 如图中红线所示, 整体锁定范围向左侧偏移, 腔模谐振频率处 (图中红点) 也向左偏移, 当正向扫描激光电流时, 锁定区域变小, 而反向扫描激光电流则锁定区域变大. 因

此在利用光学反馈锁定激光频率和压窄线宽的过程中, 需要实时调整和锁定反馈相位, 使得锁定的稳定性和鲁棒性最佳.

3 实验装置

基于光学反馈的频率离散窄线宽激光产生系统如图 4 所示, 实验中使用 TO 封装的 DFB 激光器作为光源, 中心波长为 1388.8 nm, 最大输出功率为 12.5 mW. 激光器通过非球面透镜准直后放在 Newport 的 ZeroDrift 热补偿镜架上, 镜架安装在低热膨胀系数的殷钢加工件上, 并固定在殷钢底板上. 激光出射后先通过由 $1/2$ 波片、偏振分光棱镜 (PBS) 和 $1/4$ 波片组成的光强控制模块, 其中

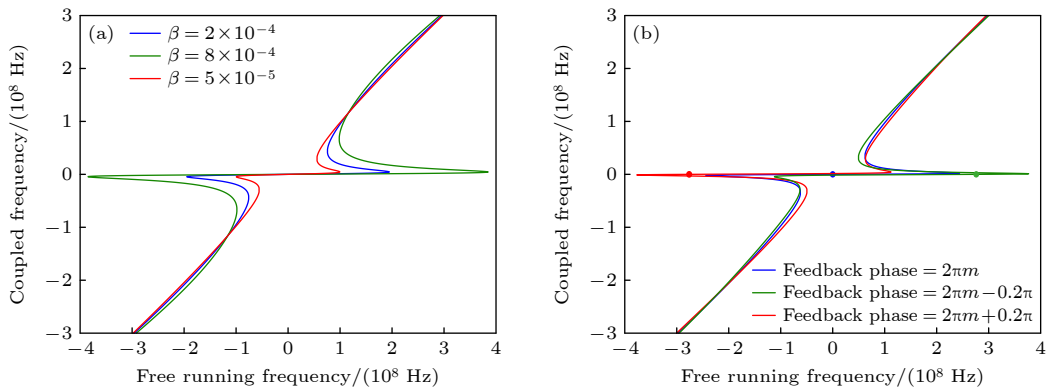


图 3 锁定范围的变化 (a) 不同反馈率; (b) 不同反馈相位

Fig. 3. Variation of the locking range: (a) Different feedback rates; (b) different feedback phase.

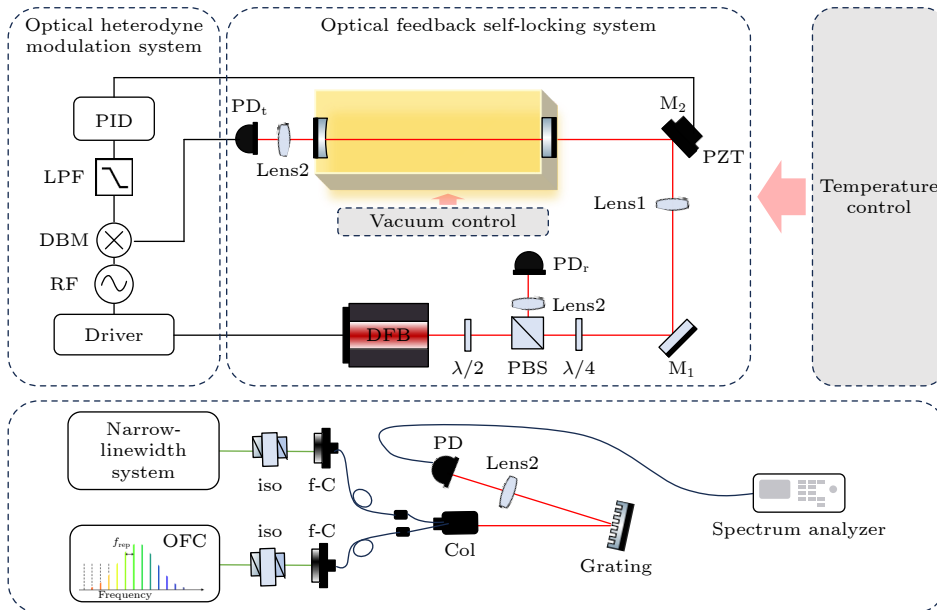


图 4 实验装置

Fig. 4. Experimental apparatus.

旋转 $1/2$ 波片可以调节出射光强, 旋转 $1/4$ 波片可以控制反馈光的反馈率到 10^{-5} — 10^{-4} . 随后激光经过一个焦距为 75 mm 的模式匹配透镜 lens1 耦合到线型超稳腔. 激光器到外腔的距离先粗控在 1 倍腔长 220 mm 左右, 再通过光路上的压电陶瓷 PZT 精密控制反馈距离, 从而使反馈光相位为 2π 的整数倍. 实验所用的超稳腔腔体由低膨胀系数的微晶玻璃构成, 腔体两端粘贴有高反射率镜片, 反射率均为 99.994%, 其中入射端为平面镜, 出射端为平凹镜, 曲率半径为 250 mm, 两镜面的距离为 220 mm. 线型腔的自由光谱区为 680 MHz. 光在超稳腔内共振, 透过平面镜的激光会原路反馈回激光器中, 而透过平凹镜的激光被小焦距透镜 lens2 聚焦到光电探测器 PD_t 中, 用来观察透射腔膜的变化.

整个系统被放在双层铝制机箱中, 中间填充保温材料. 铝制机箱内部通过热敏电阻、帕尔贴、散热块、风扇以及 PID 温控模块对系统进行整体温控. 其中, 热敏电阻放置于超稳腔腔体上, 并与温度控制器相连, 随时测量腔体温度, 帕尔贴置于机箱箱壁上, 其内外侧都安装有风扇和散热块. 首先利用温度控制器将温度设置在 $30\text{ }^\circ\text{C}$, 当腔体温度低于设置温度时, 温度控制器驱动帕尔贴加热, 并通过运转的风扇和散热块将热量均匀散布在整个机箱内; 当腔体的温度高于设置温度时, 温度控制器驱动帕尔贴制冷, 同时也通过运转的风扇和散热块使机箱内整体温度降低并分布均匀. 该系统的温度控制精度能达到 $\pm 0.001\text{ }^\circ\text{C}$. 为避免机械振动对系统带来干扰, 整个殷钢底板与机箱底部通过减振垫连接, 同时用加工的树脂挡风罩将光学腔罩住以避免风扇带来的扰动. 超稳腔内使用涡旋真空泵将真空度保持在 40 Pa. 通过隔振、温控和压控, 能极大地抑制超稳腔谐振频率的漂移.

通过以上措施, 整个光学系统在机箱内可以依靠光学反馈自锁定保持锁定状态数分钟, 但因为仍然存在的微小振动、反馈光相位漂移以及激光器自身的频率漂移等原因激光频率会逐渐偏离锁定区域, 不能实现长期锁定. 为了解决这个问题, 我们引入一个额外的反馈伺服回路. 首先使用一个 1.1 MHz 的高频正弦信号对 DFB 激光器电流进行调制产生边带, 再将调制信号和光电探测器 PD_t 接收的透射信号进行拍频解调, 获得误差信号. 误差信号通过一个带宽为 1 kHz 的低通滤波器滤掉

高频噪声并经过 PID 控制器进行比例、积分参数调整后反馈到平面高反镜 M_2 后的压电陶瓷 PZT 上, 通过 PZT 的伸缩实现对反馈相位的动态控制, 使其始终满足 2π 的整数倍, 实现激光到谐振腔的频率锁定.

利用 PBS 分出的一束激光耦合进光纤并与光学频率梳 (Mid-IR/0031) 通过一个 50/50 的保偏光纤分束器进行拍频, 拍频光由光纤准直器输出并入射至闪耀光栅 (BG25-600-1250) 分离目标波长, 选取光栅的一级衍射光由透镜聚焦到光电探测器 PD, 探测器的 AC 信号输入到频谱分析仪 (N9010A) 进行激光线宽和频率长期稳定性的测量.

4 分析与讨论

4.1 反馈相位锁定

在整套系统的锁定过程中, 同时存在着光学反馈与电反馈, 二者在稳频过程中承担着本质不同的功能. 光学反馈是由超稳腔滤波后的窄带光反馈回激光器腔内, 直接作用于激光器有源区, 抑制激光的相位噪声, 因此光反馈是实现激光线宽数量级压窄的决定性因素; 而电反馈通过伺服控制外部光路长度从而补偿因环境扰动、热漂移等因素引起的反馈相位变化, 维持光学反馈所需的相位条件, 保障锁定状态的长期稳定性. 电反馈本身并不直接抑制激光的高频相位噪声, 也不决定线宽压窄的物理极限, 其作用在于为光学反馈提供稳定的工作条件. 二者的协同作用使系统同时具备超窄瞬时线宽与良好的长期频率稳定性. 以下是光学反馈和电反馈锁定过程的实验结果.

在光反馈作用下, 对激光器电流进行低频 (10 Hz) 扫描, 探测器 PD_t 获得的透射腔模信号如图 5(a) 黑线所示. 可以看出由于光学反馈的存在, 透射腔模出现明显的展宽现象, 说明激光在很宽的驱动电流变化范围内都与超稳腔保持共振锁定, 这一实验现象与理论分析结果一致. 图中光反馈锁定范围已经接近腔的自由光谱区范围, 即大约 680 MHz, 具有很好的鲁棒性. 若此时关闭扫描, 激光会在光反馈作用下自锁定数分钟, 但是由于反馈相位的漂移, 导致激光频率会逐渐漂移出锁定范围, 出现失锁现象, 因此需要进一步采用调制/解调技术锁定反馈相位. 通过调制/解调获得的误差信号如图 5(a) 红线所示, 其具有很好的奇对称性.

关闭激光电流扫描并且将误差信号反馈到 M_2 后的 PZT 上后, 实现反馈相位锁定后, 腔模信号 (黑线) 与误差信号 (红线) 分别如图 5(b) 所示. 可知通过动态调整反馈相位, 透射腔模被锁定到最高点, 同时误差信号被稳定地控制在零点处, 此时激光频率被锁定到谐振腔模中心频率上. 在实验室环境下该锁定状态可以持续数天. 我们所使用的谐振腔的腔模线宽为 13 kHz, 因此理论上激光线宽被压窄到 13 kHz 以下.

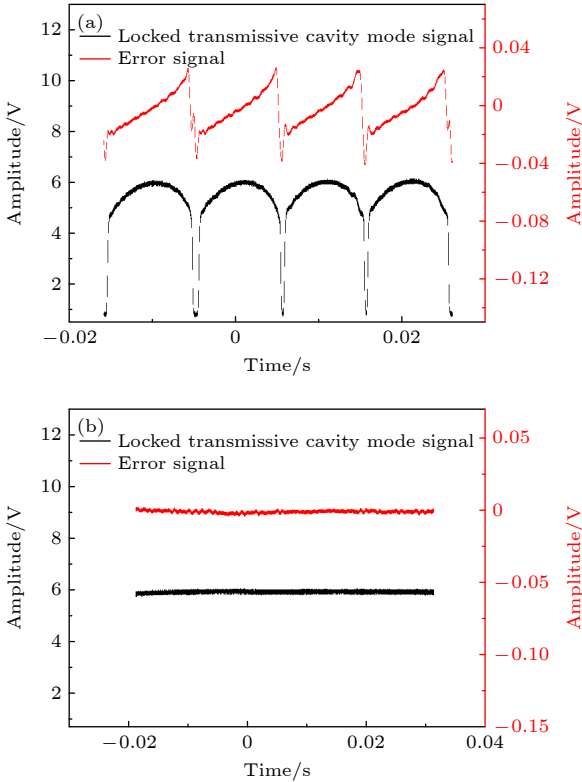


图 5 透射腔模信号和误差信号 (a) 锁定前; (b) 锁定后
Fig. 5. Measured transmission cavity mode and error signal: (a) Before locking; (b) after locking.

4.2 激光线宽测量

将锁定后的激光和光梳拍频, 拍频光通过光电探测器 PD 将光信号转化为电信号后输入频谱分析仪获得实时拍频信号, 采集频谱的波形, 利用 Origin 软件进行洛伦兹线型拟合, 得到频谱线宽. 图 6 是激光和光梳的实时拍频信号和拟合结果, 可得拍频谱的半高宽为 3.93 kHz. 由于拍频功率谱的半高宽为两拍频激光器的线宽之和, 而光梳线宽极窄 (<1 Hz/s), 因此可近似利用拍频功率谱的半高宽来表示待测激光线宽. 激光器在光学反馈和反馈相位锁定状态下线宽被压窄到 $\Delta\nu \approx 3.93$ kHz.

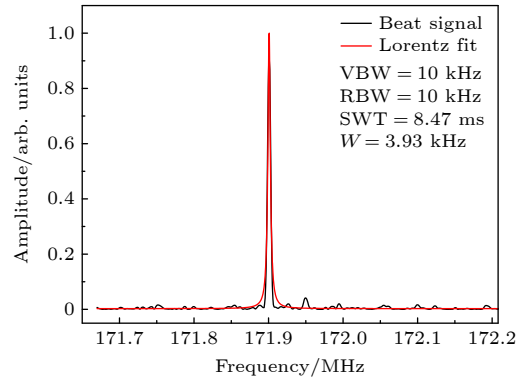


图 6 激光和光梳的实时拍频信号以及拟合结果

Fig. 6. Real-time beat frequency signal between the laser and the optical comb, as well as the fitting results.

为了对比激光线宽的压窄程度, 测量了自由运转下 DFB 激光器的线宽. 测量原理是基于比尔-朗伯定律, 在某一气体分子吸收谱线展宽范围内, 如果激光的频率发生变化, 则经过气体吸收后的透射光强也会改变. 实验中所使用的激光器波长对应 H_2O 分子的吸收线, 因此利用 H_2O 分子直接吸收谱线上某一锁定点的斜率作为鉴频器对自由运转下的激光器线宽进行测量. 具体方案为: 将自由运转下的激光通过光纤耦合进光程为 10 m、气压控制在 30 Torr ($1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$) 的气池, 经过水汽吸收后其透射光由光电探测器接收. 使用频率为 10 Hz、幅度为 200 mV 的三角波对激光器驱动电流进行扫描, 可获得完整的水的吸收谱线如图 7 所示. 通过对谱线的横坐标进行定标, 可知图 7 中锁定点左右两侧红线所限定的近似线性区域对应的频率跨度为 296.312 MHz, 幅度跨越约为 0.247 V, 因此对应的光强-频率响应率为 0.833 mV/MHz. 关闭扫描, 通过微调偏置电压使透射信号幅度保持在图 7 中锁定点 (locking point), 随后激光自由运转, 实时采集探测器所接收到的透射信号强度, 分析强度波动即可反演得到激光器在自由运转状态下的频率噪声. 图 8 为气池透射信号的频率噪声功率谱密度, 根据 β 分离线^[25] 估算得到自由运转下激光器线宽约为 1.31 MHz.

通过以上对比可知, 自由运转时 DFB 激光器的线宽为 1.31 MHz, 经过光学谐振腔反馈和反馈相位锁定后, 激光器的频率噪声被抑制, 线宽被压窄到 3.93 kHz, 实现了 3 个数量级的线宽压窄. 根据 Lang-Kobayashi 模型^[22,24], 激光线宽压窄受限于谐振腔的有效线宽、反馈率、模式匹配及相位锁

定精度等多种因素. 尽管实验所用超稳腔镜反射率高达 99.994%, 但实际环境中, 由外界机械振动、温控系统、真空泵等引入的腔长机械噪声导致腔的瞬时线宽抖动, 以及激光与腔的模式匹配不完美、反馈相位伺服残余抖动等因素, 共同限制激光线宽压窄程度. 因此, 实测线宽主要反映系统在现有噪声环境下的实际性能, 而非理想腔的理论压窄极限.

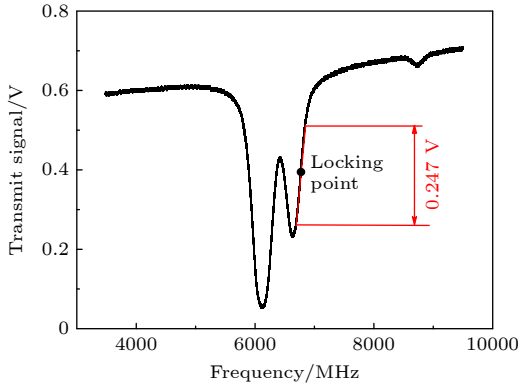


图 7 H₂O 分子直接吸收谱线
Fig. 7. Direct absorption spectral lines of H₂O molecules.

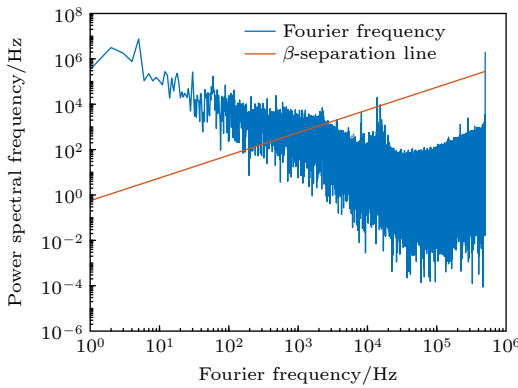


图 8 气池透射信号的频率噪声功率谱密度
Fig. 8. Frequency-noise power spectral density of the gas-cell transmission signal.

4.3 宽调谐范围下窄线宽激光的阶跃输出

在光学反馈锁定条件下, 激光器的频率调谐范围不受超稳腔的制约, 特别是在光学反馈锁定范围遍及整个超稳腔的自由光谱区时, 反馈相位的锁定状态几乎不会受到激光器驱动电流扫描的影响, 因此能实现百 GHz 范围调谐 (具体取决于 DFB 激光器本身的调谐范围). 图 9 为利用频率为 5 mHz 的 NegRamp 波扫描激光器驱动电流, 并用波长计测量获得的时域上连续、频率阶跃分布的窄线宽激光输出. 其中图 9(a) 显现了 3 个周期的扫描曲线,

每个周期 26.5 GHz 调谐范围, 包含 39 个频率台阶. 图 9(b) 是从图 9(a) 中截取了若干频率台阶. 从图 9 可以看到, 激光输出频率跃变过程并没有出现失锁现象. 其中每一台阶上稳定的激光频率对应着超稳腔的谐振频率, 相邻两稳定激光频率之间的阶跃梯度为光学腔的自由光谱范围即 680 MHz.

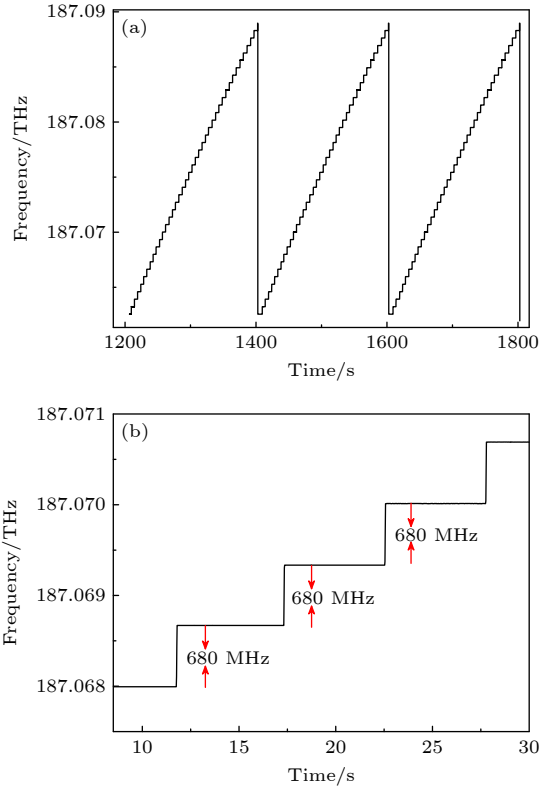


图 9 (a) 扫描激光器驱动电流获得的窄线宽激光频率阶跃输出; (b) 局部放大
Fig. 9. (a) Narrow-linewidth laser frequency stepping via laser drive current scanning; (b) local magnification.

4.4 离散型激光器的频率定标性能评估

为了量化评估离散型激光器的频率定标性能, 考察了每一个台阶在连续的周期性扫描中的频率重复性. 图 10 为在连续周期性扫描过程中, 两个相邻的阶跃频率处, 激光绝对频率的统计分布. 由图 10 可知, 每个台阶频率处, 统计图都呈现一个高而窄的峰, 实验中共统计了 39 个频率台阶, 其平均标准差为 1.69 MHz, 远优于传统的扫描激光器的频率定标误差, 证明了其具有较好的绝对频率重复性. 然而, 由于测量激光频率所使用的波长计精度有限 (约 20 MHz), 实验真实值优于测量值. 实际上, 在光反馈频率锁定情况下, 无论是激光器

输出的离散频率的重复性, 还是阶跃步长的均匀性, 都取决于超稳腔谐振频率的长期稳定性. 为了更精确地评估, 采用光频梳作为参考基准进行检验. 在不调谐的情况下, 将光学反馈锁定后的激光与光梳进行拍频并输入频谱分析仪获得实时拍频信号, 利用 Labview 程序控制数据采集卡每 5 秒采集一次拍频信号, 并记录中心频率, 监测 24 h 内拍频信号的中心频率漂移即为激光频率的长期漂移, 结果如图 11 所示. 24 h 内激光的频率漂移为 17.27 MHz, 长期稳定性表现优异. 在精密光谱测量中, 若使用 Hz 量级的扫描频率对激光波长进行扫描, 则台阶频率的标准差理论上在百 Hz 量级. 以上结果表明, 该离散激光器的频率定标精度要优于传统波长计的定标精度 (通常 >10 MHz), 对于典型半高全宽约为 1 GHz 的大气压下气体吸收线而言, 该频率定标误差导致的浓度反演误差几乎可以忽略不计. 因此本方案为高分辨率激光光谱测量提供了足够精确且稳定可靠的频率标尺, 充分满足了痕量气体检测等实际应用需求.

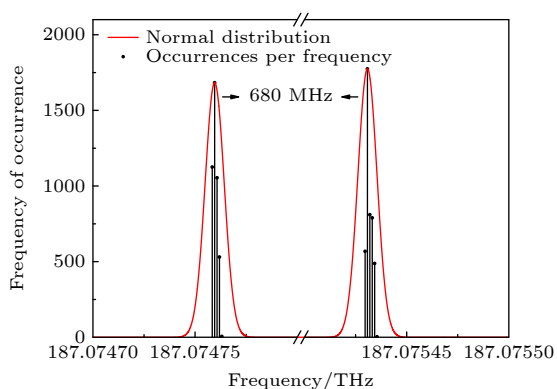


图 10 阶跃频率的统计分布

Fig. 10. Statistical distribution of step frequencies.

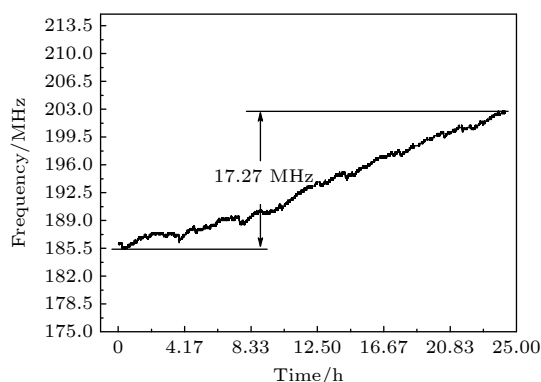


图 11 24 h 激光的频率漂移

Fig. 11. Frequency drift of the laser over 24 hours.

值得注意的是, 由于该系统输出的激光频率是阶跃式变化, 利用该激光进行后续的腔增强红外吸收光谱或者腔衰荡光谱实验研究时, 阶跃梯度的大小可以通过改变光学腔腔长从而改变光学腔的自由光谱范围实现, 从而满足了相关技术测量的分辨率要求.

5 结 论

精密激光光谱技术的核心, 在于同时追求光谱的频率定标精度和探测灵敏度. 针对这一核心问题, 本文成功提出并实现了一种基于光学反馈的、时域上连续输出、频域上离散阶跃的窄线宽半导体激光器方案. 该方案通过光学反馈将半导体激光器锁定到一个高精度超稳腔, 并结合激光器驱动电流扫描, 实现了激光频率以超稳腔自由光谱范围为固定步长的阶跃式输出. 实验结果表明, 实现光反馈频率锁定之后, 半导体激光器的线宽由自由运转时的 1.31 MHz 被压窄到 3.93 kHz, 能够显著提升其与高精度光学测量腔的耦合效率, 从而提高光谱的探测灵敏度. 在光反馈锁定条件下, 激光器的频率调谐不受光学腔的制约, 扫描激光器驱动电流可获得超过百 GHz 调谐范围下的一系列频率阶跃分布的窄线宽激光输出. 在周期性扫描过程中, 每一个频率台阶处, 激光的频率重复性平均标准差低至 1.69 MHz, 与光梳拍频获得的频率长期漂移为 17.27 MHz/24 h, 说明该激光器具有卓越的频率重复度和均匀的阶跃步长, 能够为光谱测量提供一条高精度和高稳定的频率标尺, 从根本上解决了传统扫描激光器频率定标不准、重复性差的问题.

综上所述, 本工作融合了光频梳的频率定标精度与传统可调谐半导体激光器的简易性与低成本, 走出了一条在性能与实用化之间取得优异平衡的技术路径. 未来, 通过采用超稳腔等更稳定的参考基准, 并进一步优化反馈伺服系统的带宽与稳定性, 有望在保持系统紧凑性的同时, 将频率定标精度推向更高水平. 本方案不仅在痕量气体检测领域具有直接的应用前景, 也为量子信息、冷原子物理等需要快速、精确频率扫描的科学研究提供了一种新型的光源解决方案.

参考文献

- [1] Chen H, Winderlich J, Gerbig C, Hofer A, Rella C W, Crosson E R, Van Pelt A D, Steinbach J, Kolle O, Beck V

- 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 375
- [2] Griffis T J, Baker J M, Sargent S D, Tanner B D, Zhang J 2004 *Agric. For. Meteorol.* **124** 15
- [3] Li Y, Zhou X B, Zhao G, Yin R T, Yang J Q, Yan X J, Ma W G 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 064209 (in Chinese) [李勇, 周晓彬, 赵刚, 尹润涛, 杨家琪, 闫晓娟, 马维光 2025 物理学报 **74** 064209]
- [4] Malowany K, Stix J, Van Pelt A, Lucic G 2015 *Atmos. Meas. Tech.* **8** 4075
- [5] Yan X J, Yang S, Kou X L, Fu T X, Yang J Q, Zhao G, Ma W G 2025 *Anal. Chem.* **97** 11119
- [6] Hawthorn C J, Weber K P, Scholten R E 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 4477
- [7] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [8] Zeller W, Naehle L, Fuchs P, Gerschuetz F, Hildebrandt L, Koeth J 2010 *Sensors* **10** 2492
- [9] Hugi A, Maulini R, Faist J 2010 *Semicond. Sci. Technol.* **25** S3001
- [10] Black E D 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
- [11] Shi X H, Zhang J, Zeng X Y, Lü X L, Liu K, Xi J, Ye Y, Lu Z H 2018 *Appl. Phys. B* **124** 153
- [12] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [13] Guo S J, Zhou Y T, Wu Y Q, Zhou X B, Tian J F, Zhao G, Ma W G, Dong L, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Jia S T 2021 *Spectrosc. Spect. Anal.* **41** 339 (in Chinese) [郭松杰, 周月婷, 吴永前, 周晓彬, 田建飞, 赵刚, 马维光, 董磊, 张雷, 尹王保, 肖连团, 贾锁堂 2021 光谱学与光谱分析 **41** 339]
- [14] Wang B, Yao J Q, Wu H B, Shen Y, Xie C D, Wang H 2004 *J. Quantum Opt.* **10** 82 (in Chinese) [王波, 姚景芹, 武海斌, 沈云, 谢常德, 王海 2004 量子光学学报 **10** 82]
- [15] Manfred K M, Ciaffoni L, Ritchie G A D 2015 *Appl. Phys. B* **120** 329
- [16] Tian J F, Zhao G, Fleisher A J, Ma W G, Jia S T 2021 *Opt. Express* **29** 26831
- [17] Chen Y, Yang N N, Fang B, Zhao W X, Zhang W J, Li S S, Cui W H 2024 *Appl. Phys. B* **130** 143
- [18] Piel C, Romanini D, Farradèche M, Chaillot J, Paul C, Bienville N, Lauwers T, Sauze J, Jaulin K, Prié F, Landais A 2024 *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **17** 6647
- [19] Xie R F, Guan S Y, Tan Z Q 2025 *Opt. Commun.* **574** 131105
- [20] Fasci E, Coluccelli N, Cassinerio M, Gambetta A, Hilico L, Gianfrani L, Laporta P, Castrillo A, Galzerano G 2014 *Opt. Lett.* **39** 4946
- [21] Yang J Q, Zhao G, Jiao K, Gao J, Yan X J, Zhao Y T, Ma W G, Jia S T 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 014205 (in Chinese) [杨家齐, 赵刚, 焦康, 高健, 闫晓娟, 赵延霆, 马维光, 贾锁堂 2024 物理学报 **73** 014205]
- [22] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [23] Dahmani B, Hollberg L, Drullinger R 1987 *Opt. Lett.* **12** 876
- [24] Laurent P, Clairon A, Breant C 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 1131
- [25] Domenico G Di, Schilt S, Thomann P 2010 *Appl. Opt.* **49** 4801

Frequency-discrete narrow-linewidth semiconductor laser generation technology for precision spectroscopy*

YAN Xiaojuan¹⁾³⁾ HUANG Xincheng²⁾³⁾ ZHANG Zihao²⁾³⁾ CHENG Ziwei²⁾³⁾
 ZHOU Xiaobin¹⁾³⁾ YANG Jiaqi¹⁾³⁾ ZHAO Gang^{2)3)†} MA Weiguang^{2)3)‡}

¹⁾ (College of Physical Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

²⁾ (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

³⁾ (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 13 November 2025; revised manuscript received 12 January 2026)

Abstract

High-precision laser spectroscopic techniques, crucial for applications such as trace gas sensing, impose stringent and often conflicting demands on both ultra-narrow laser linewidth and high-accuracy frequency calibration. Conventional approaches struggle to simultaneously satisfy these requirements: optical frequency

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFF0714700), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62327813, 61905136, 62175139), the Central Guidance on Local Science and Technology Development Fund of Shanxi Province, China (Grant No. YDZJXS2024D001), the Key R&D Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202302090301014), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202403021222027), and the Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province, China (Grant No. 20220001).

† Corresponding author. E-mail: gangzhao@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: mwg@sxu.edu.cn

combs provide superior frequency markers but require complex and costly parallel detection systems, whereas traditional tunable lasers are simple yet lack precise frequency calibration. To bridge this gap, this paper proposes and experimentally validates a novel scheme for generating a frequency-discrete, narrow-linewidth semiconductor laser based on optical feedback locking to a high-finesse ultrastable optical cavity.

The scheme employs a high-finesse linear Fabry-Pérot cavity-with a free spectral range (FSR) of 680 MHz and a mirror reflectivity of 99.994%-as the fundamental frequency reference. Its high-performance stabilization is achieved through a synergistic dual-loop control mechanism. First, the resonantly filtered optical field from the high-finesse ultrastable cavity is fed back into a distributed feedback (DFB) semiconductor laser. This optical feedback acts on the laser's active region, effectively suppressing its phase noise. Second, a low-bandwidth electronic servo loop dynamically stabilizes the optical feedback phase via a piezoelectric transducer, enabling robust and sustained frequency locking. Notably, the optical feedback locking range spans nearly the entire cavity FSR (~ 680 MHz), ensuring exceptional robustness against perturbations.

Under this dual-feedback locked state, the laser exhibits a unique operating characteristic. Continuous scanning of the laser injection current produces an output that is continuous in the time domain but discrete in the frequency domain. The output frequency undergoes precise, deterministic stepwise tuning, with each frequency jump exactly equal to the cavity FSR. This generates a series of discrete, narrow-linewidth frequency points, achieving a wide tuning range exceeding tens of gigahertz (e.g., 26.5 GHz containing 39 distinct frequency steps in a single scan cycle).

The laser's performance is rigorously characterized through heterodyne beating with an optical frequency comb. Experimental results demonstrate a linewidth reduction from 1.31 MHz in free-running operation to 3.93 kHz under locked conditions, corresponding to suppression by three orders of magnitude. The frequency calibration capability is evaluated by analyzing the repeatability of each discrete frequency step during periodic scanning, yielding an average standard deviation better than 1.69 MHz-surpassing the calibration precision of typical wavemeters (>10 MHz) by an order of magnitude. Furthermore, the system exhibits excellent long-term stability, with a measured frequency drift of only 17.27 MHz over 24 hours, underpinned by stringent environmental controls including temperature stability of ± 0.001 °C.

The proposed laser architecture successfully integrates the key advantages of disparate technologies. It delivers high frequency-calibration accuracy by using the stable cavity FSR as a precise "optical ruler". Concurrently, it retains the practical benefits of traditional scanning lasers: its serial output enables complete spectral acquisition using a single photodetector, drastically simplifying the detection scheme. This fusion of precision, wide tunability, robustness, and practical simplicity offers a highly competitive light-source solution, paving the way for low-cost, compact spectroscopic sensing systems with high sensitivity and accuracy.

Keywords: optical feedback locking, linewidth narrowing, frequency step output

DOI: [10.7498/aps.75.20251552](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251552)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251552](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20251552)

面向精密光谱的频率离散窄线宽半导体激光产生技术

闫晓娟 黄新成 张梓浩 程子伟 周晓彬 杨家琪 赵刚 马维光

Frequency-discrete narrow-linewidth semiconductor laser generation technology for precision spectroscopy

YAN Xiaojuan HUANG Xincheng ZHANG Zihao CHENG Ziwei ZHOU Xiaobin YANG Jiaqi ZHAO Gang MA Weiguang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090408 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251552

CSTR: 32037.14.aps.75.20251552

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251552>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光学反馈频率锁定的窄线宽稳定中红外激光产生技术研究

Research on generation of stable mid-infrared lasers with narrow linewidths based on optical feedback locking

物理学报. 2024, 73(1): 014205 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231049>

结合光学反馈以及光学锁相环的量子级联激光器线宽压窄和频率控制技术研究

Research on linewidth narrowing and frequency control technology of quantum cascade lasers based on optical feedback and optical phase-locked loops

物理学报. 2025, 74(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241414>

基于稳频激光的超窄线宽 π 相移光纤布拉格光栅应变测量

Strain measurement of ultra-narrow linewidth π -phase-shifted fiber Bragg grating based on frequency-stabilized laser

物理学报. 2025, 74(19): 190701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250701>

基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的2 μ m波段水的超光谱吸收测量

Hyperspectral absorption of water around 2 μ m based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser

物理学报. 2022, 71(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212127>

光学反馈线性腔衰荡光谱技术不确定性

Uncertainty of optical feedback linear cavity ringdown spectroscopy

物理学报. 2022, 71(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220186>