

面向 Rb 原子精密测量的边带锁定 780 nm 高功率激光源

魏珊珊^{1,2}, 刘元煌^{1,2}, 陈群峰³, 姚波², 张骥^{1,2}, 周林³, 毛庆和^{1,2*}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071

摘要 报道一种自主设计研制的面向 Rb 原子精密测量应用的 780 nm 高功率激光源样机。该样机采用线偏振、窄线宽且频率可宽带调谐的单个 1560 nm 光纤激光器作为种子源, 通过有效提升光纤放大器的输出功率, 经 PPLN 倍频产生的 780 nm 激光功率高达 2.25 W。采用边带锁定的饱和吸收稳频技术, 高功率 780 nm 激光中心频率可长期稳定在 ± 150 kHz 以内, 且可精确调谐 1.2 GHz, 线偏振度高达 23 dB。该样机操作方便、可搬运, 非常适合于 Rb 原子的精密测量应用。

关键词 激光器; 光纤激光器; 超冷铷原子; 边带锁定; 频率调谐

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0701008

1 引言

铷(Rb)原子在基于原子的精密测量^[1]中具有重要应用, 人们一直在致力于发展对应 Rb 原子 D2 跃迁的线偏振、窄线宽且频率稳定的 780 nm 激光源^[2]。特别是在超冷⁸⁷Rb 原子制备^[3]过程中, 至少需要两种不同频率的冷却光以及它们频率相隔 6.8 GHz 的再泵浦光(或回泵光)同时作用于磁光阱^[4]来囚禁⁸⁷Rb 原子。最初, 人们使用两只 780 nm 激光二极管^[5](LD)分别锁定到⁸⁷Rb 的 $F=2 \rightarrow F'$ 和 $F=1 \rightarrow F'$ 超精细能级跃迁谱线上, 再通过运用不同频移量的声光调制器, 来获取不同频率的冷却光和再泵浦光。但这种方法需要使用两套稳频装置, 为获取高功率还要分别后接锥形放大器^[6], 输出光束质量差。随着 1.5 μm 波段高功率掺铒光纤放大器(EDFA)逐渐走向实用^[7], 人们改用两只 1560 nm 的 LD 作为种子激光, 经 EDFA 功率提升后, 再由周期极化铌酸锂(PPLN)晶体各自倍频产

生出 780 nm 激光^[8-9], 当将其中一只 LD 种子的倍频光锁定到⁸⁷Rb 的 $F=2 \rightarrow F'$ 超精细能级跃迁谱线后, 就获得了参考激光, 另一台 LD 及其产生的 780 nm 激光即可通过拍频技术锁定到该参考激光器, 能确保该 780 nm 激光的频率稳定性, 还可通过改变拍频锁定工作点, 实现对其频率的精确扫描。但是, 该方案需要使用两只 LD, 且线宽在 MHz 量级, 难以作为相干操作激光, 满足原子干涉仪的高精度测量^[10]及大动量转移等技术^[11]中对 780 nm 激光器 kHz 线宽的要求。尽管钛宝石(Ti:Sapphire)激光器^[12]的线宽窄至 kHz, 直接输出功率高达 W 量级, 且可大范围频率调谐, 能够直接获取这种高功率、窄线宽的 780 nm 激光, 但存在着体积大、成本高、维护困难且不能搬运等问题, 极大地限制了高精度原子干涉仪等应用的实用化进程。

随着 1.5 μm 波段单纵模光纤激光器的不断发展, 其线宽已达 kHz 量级^[13], 并与 EDFA 兼容, 特别是已发展出了多种精细的频率调谐机制^[14], 使得

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB21010300)、国家自然科学基金(61805258, 61377044)、先进激光技术安徽省实验室主任基金(20191001)

*E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

人们很自然地想到以 1560 nm 单纵模光纤激光器替代 Ti:Sapphire 和 LD 作为种子源,获取这种窄线宽的 780 nm 激光。2014 年,法国 ONERA 的 Theron 等^[15]提出并演示了一种基于单个 1560 nm 波段光纤激光器的边带锁定技术,通过对种子激光的相位调制,将其 780 nm 倍频光的一个调制边带锁定到⁸⁵Rb 的 $F=3 \rightarrow F'=CO3-4$ 超精细跃迁谱线上,通过改变调制边带频率,就可获取超冷⁸⁷Rb 原子制备过程中所需的不同频率冷却光以及与它们频率相隔 6.8 GHz 的再泵浦光,且精密扫描频率范围已达 1 GHz^[15]。但是,这种基于单个 1560 nm 激光器、EDFA 放大和 PPLN 倍频的边带锁定 780 nm 激光系统的最高功率仅为 1.2 W^[16],难以满足具有双原子源系统的原子重力梯度仪以及采用大动量转移技术的原子干涉仪等应用中对 780 nm 激光输出功率的要求。尽管通过腔增强技术^[17-18]和级联 PPLN^[19]倍频等方法可以提升 780 nm 激光功率,但却增加了系统复杂性。因此,提高 780 nm 激光功率的更切实可行的途径是设法提高 EDFA 对基频光的放大效果,特别是应提升结构简单的商用 975 nm 高功率 LD 包层泵浦双包层钕镱共掺光纤(EY-DCF)放大器对基频光的放大效果^[20],才有望构建出基于单个 1560 nm 光纤激光种子的小型可搬运的高功率窄线宽 780 nm 激光系统。

本文报道了一种自主设计研制的面向 Rb 原子精密测量应用的边带锁定 780 nm 高功率激光源样机及其测试结果。该样机采用自主研制的单个

1560 nm 线偏振、窄线宽且频率可调谐的分布式布拉格反射(DBR)光纤激光器作为种子源,通过有效提升光纤放大器对线偏振窄线宽 1560 nm 激光的放大效果,将经 PPLN 倍频产生的 780 nm 功率提升到 2.25 W。通过饱和吸收和边带锁定技术,使得高功率 780 nm 激光具有频率稳定、线宽窄且线偏振度高等特性的同时,还能满足在一台激光器上同时获得冷却光、再泵浦光及原子干涉相干操作激光^[21]。这种集成的 780 nm 高功率激光源操作方便、可搬运,非常适合于 Rb 原子精密测量应用。

2 激光系统结构

图 1 为自主设计研制的基于 1560 nm 窄线宽光纤激光器种子源和商用 975 nm 高功率 LD 包层泵浦 EY-DCF 放大器的边带锁定 780 nm 激光源的结构示意图,除特别说明外,光学系统均由保偏光纤和保偏光器件构成。其中的 1560 nm 线偏振窄线宽种子激光由自主研制的 DBR 单纵模光纤激光器提供,该激光器为隔振绝热封装的模块结构,具有优良的低噪声特性,在室温下的中心波长为 1560.48 nm,输出功率约为 0.5 mW,3 dB 线宽约为 1.25 kHz。种子激光模块带有精密温度控制,可通过改变控制温度来实现频率调谐,频率的温度调谐系数为 1.25 GHz/°C;种子激光模块中还内置了压电陶瓷(PZT),可通过调控 PZT 的电压来精密调节 DBR 激光器的腔长,实现对种子激光的精细频率调谐,频率的电压调谐系数为 230 MHz/V。1560 nm 种

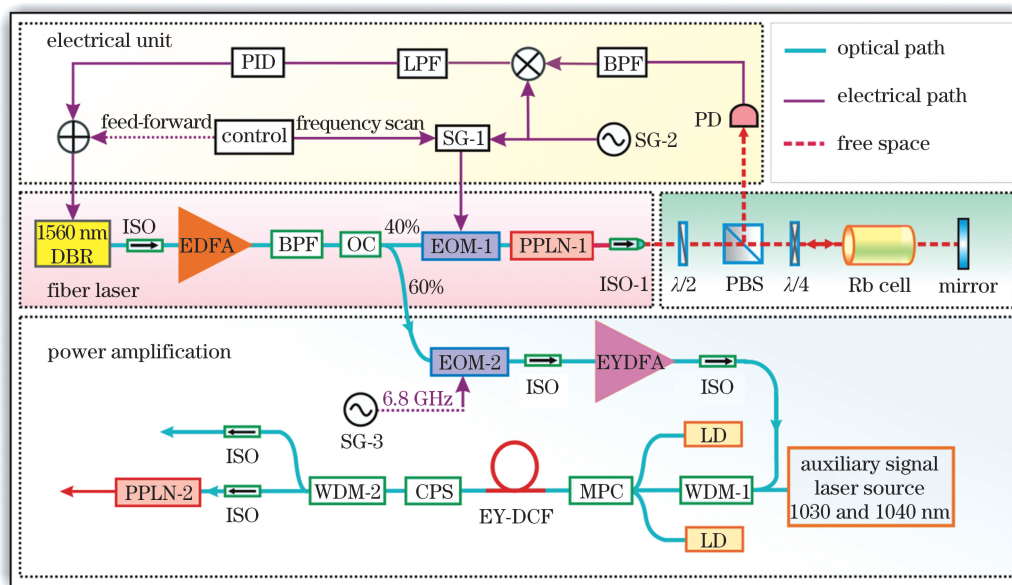


图 1 边带锁定高功率 780 nm 激光源结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sideband-locked high-power 780 nm laser system

子激光先由单模掺铒光纤放大器(EDFA)放大,该 EDFA 的增益光纤为长度 70 cm 的 Er80-4/125-PM (Liekki)光纤,由 975 nm 单模尾纤 LD 经波分复用(WDM)正向泵浦,在 780 mW 泵浦功率下,该 EDFA 可将 1560 nm 种子激光放大到 152 mW。放大输出的种子激光经过 3 dB 带宽为 1 nm 的带通滤波器,滤除由 EDFA 产生的宽带放大自发辐射(ASE),消除后续级联光纤放大器中的 ASE 积累。经 ASE 滤除后的激光功率为 145 mW,由 40 : 60 的保偏耦合器(OC)分为两路。

由 OC 的 40% 端口输出的激光经相位调制器(EOM-1)后,由带有精密温度控制的带尾纤的波导型 PPLN 晶体倍频与和频,产生 780 nm 激光。所产生的 780 nm 激光经隔离器(ISO-1)后,准直为光斑直径为 2.3 mm 的光束,再由 $\lambda/2$ 波片、偏振分束器(PBS)和 $\lambda/4$ 波片调控其偏振状态,使得耦合进入铷原子蒸汽吸收池的光束在吸收池中产生饱和吸收,并由其后端放置的反射镜反射,反射光将起到探测光的作用。探测光经 PBS 分离后,由带宽 150 MHz 的光电探测器(PD)探测,经带宽 20 MHz 的带通滤波器滤波后,进入混频器解调,得到鉴频信号,再由低通滤波器滤波后,通过比例-积分-微分(PID)电路,反馈控制 1560 nm 种子激光器的内置 PZT,最终,将种子激光产生的 780 nm 倍频光的一个调制边带频率锁定到⁸⁵Rb 原子 D2 超精细谱线 $F=3 \rightarrow F'=4$ 上。这样,通过扫描信号发生器(SG-1)加载到 EOM-1 的调制频率上,就可实现对 1560 nm 种子激光及其 780 nm 倍频光载波频率的大范围频率调谐,获取⁸⁷Rb 的不同频率冷却光。

由于种子激光的调制边带已锁定,因此,经 OC 的 60% 端口输出的 1560 nm 激光频率也已锁定。该 1560 nm 激光由两级 EY-DCF 放大器进行功率提升。两级 EY-DCF 放大器中所用增益光纤均为保偏 EY-DCF(DCF-EY-10/128-PM, CorActive, 加拿大),纤芯直径和数值孔径分别为 10 μm 和 0.2,在 976 nm 处的吸收系数为 6 dB/m;匹配光纤为 DCF-UN-8/125-14-PM(CorActive, 加拿大)型双包层光纤,其在 1.5 μm 波段为单模传输,以同时保证与单模 PM1550 之间的模场匹配。第一级 EY-DCF 放大器的增益光纤长度为 2 m,由最大输出功率为 25 W 的 976 nm 高功率 LD 泵浦源经泵浦合束器(MPC)前向包层泵浦增益光纤,当泵浦功率为 12 W 时,1560 nm 激光输出功率达 2.3 W;第二级 EY-DCF 放大器中的泵浦源为由两只 25 W 的

976 nm 带尾纤高功率 LD,经 MPC 前向包层泵浦增益光纤,优化的增益光纤长度为 3.8 m(见下节),剩余泵浦光则由接在增益光纤后的泵浦剥离器(CPS)剥离。在第二级 EY-DCF 放大器中,采用了能克服增益光纤非均匀加宽效应的 1 μm 波段双波长辅助信号注入的方案,以抑制强泵浦下的 Yb-ASE 自激振荡,提升放大器的 1560 nm 激光输出功率^[22]。该双波长辅助信号通过 1060/1560 nm 保偏 WDM-1 注入至 EY-DCF 放大器中,放大后的注入辅助信号则由另一只保偏 WDM-2 滤除,WDM 尾纤为 PM1550 单模光纤,对 1.5 μm 波段激光的插入损耗约 0.4 dB。放大后的 1560 nm 激光由 PM1550 尾纤的快轴截止隔离器输出,插入损耗约 0.7 dB。由第二级 EY-DCF 放大器输出的 1560 nm 激光经输入输出单模尾纤分别为 PM1550 和 PM850 的 PPLN 晶体倍频与和频,产生 780 nm 激光。该 PPLN 晶体也配有精密温度控制,以确保倍频效率和稳定性。为避免放大后的窄线宽 1560 nm 激光因功率过高而在光纤传输过程中产生受激布里渊散射(SBS)效应,尽可能地减小了图 1 中级联 EY-DCF 放大器链路的总长度,实际链路总长度约 9.2 m。为了同时获得与⁸⁷Rb 冷却光频率相隔 6.8 GHz 的再泵浦激光,在 OC 的 60% 输出端附近还接入了 EOM-2,对其加载 6.8 GHz 微波信号,通过载波与其+1 阶调制边带在 PPLN 晶体内的和频,即可获得再泵浦光。

图 1 所示的 780 nm 激光系统除饱和吸收装置及其稳频反馈电路外,均集成在 4U 标准机箱内,且机箱面板上预留温度控制、PZT 调谐、EOM 调制及 780 nm 激光输出端口,具有结构紧凑、可搬运和使用方便等优点。

3 测试结果

调整 PPLN-1 的控制温度,可使 1560 nm 种子激光处在 PPLN-1 倍频的准相位匹配接收带的峰值附近,这时,由 OC 的 40% 端口输出的 1560 nm 激光倍频产生的 780 nm 激光功率最高,达 2.8 mW,经由光谱分析仪(OSA, AQ6370D, Yokogawa, 日本)测量该 780 nm 倍频光光谱,信噪比大于 60 dB。对种子激光器内置 PZT 施加一幅度为 ± 2 V、频率为 20 Hz 的三角波扫描信号,则种子激光频率将在其中心波长附近的 ± 460 MHz 范围内扫描。由于对应于⁸⁵Rb 原子 $F=3 \rightarrow F'=4$ 跃迁的多普勒展宽吸收谱宽约 500~600 MHz^[23],因此,通过对种子激光控

制温度的精密调节,就可扫描出对应于 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'$ 跃迁的饱和吸收峰。

然后,再通过使用信号发生器 SG-1 对 EOM-1 施加固定频率为 1.07 GHz 的微波调制信号,则在种子激光中心频率处将产生 ± 1 阶两个调制边带,由于 1.07 GHz 调制边带仍处在 PPLN-1 准相位匹配接收带的峰值附近,并不需要调节晶体控制温度。再次调节种子激光的控制温度,就可通过三角波信号扫描种子激光频率,利用其 $+1$ 阶 1.07 GHz 调制边带倍频光扫描出对应于 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'$ 跃迁的吸收谱。当图 1 中的饱和吸收池光路优化后,可由接在 PD 后的示波器观察到该调制边带倍频光扫描得到的对应于 ^{85}Rb 原子超精细能级跃迁的饱和吸收光谱,图 2 为实测的扫描结果。由图可见,该边带扫描获得的饱和吸收光谱清晰地展现出了 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'$ 跃迁中的 $F=3\rightarrow F'=\text{CO}2-4$ 和 $F'=\text{CO}3-4$ 饱和吸收交叉共振峰以及 $F=3\rightarrow F'=4$ 超精细能级跃迁^[24],表明测得的饱和吸收光谱精确可靠。

由于对应于 ^{87}Rb 的 $F=2\rightarrow F'=3$ 跃迁^[25]和 ^{85}Rb 的 $F=3\rightarrow F'=\text{CO}3-4$ 跃迁之间的频率间隔为 1.07 GHz,当将 780 nm 倍频光的 $+1$ 阶 1.07 GHz 调制边带锁定到 ^{85}Rb 的 $F=3\rightarrow F'=\text{CO}3-4$ 饱和吸收交叉共振峰上时,对应于种子激光中心频率的 780 nm 倍频光自然也对应于 ^{87}Rb 原子的 $F=2\rightarrow F'=3$ 跃迁频率^[15]。为此,使用 SG-2 对倍频光的 1.07 GHz 调制边带叠加 10 MHz 的正弦调制信号,通过混频和低通滤波后,可解调出如图 2 中 B 曲线所示的对应于 ^{85}Rb 的 $F=3\rightarrow F'$ 跃迁频率的误差信号。可见,对应于 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow$

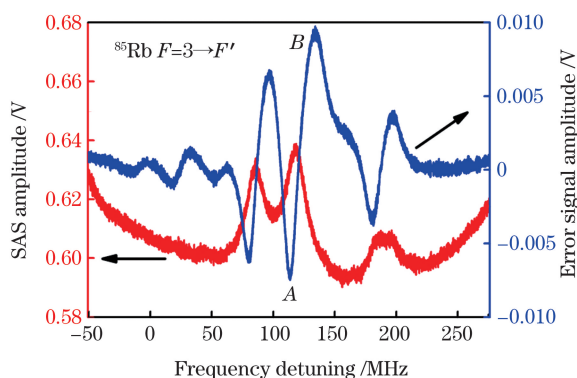


图 2 测得的 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'$ 跃迁的饱和吸收光谱及其误差信号

Fig. 2 Measured saturation absorption spectroscopy and error signal of ^{85}Rb atomic $F=3\rightarrow F'$ transitions

$F'=\text{CO}3-4$ 超精细能级跃迁的误差信号幅度峰-峰值(A 和 B 两点之间)为 16.78 mV,对应的频率失谐量为 20 MHz,故鉴频系数(频率分辨率)约为 1.192 MHz/mV,完全满足 PID 反馈电路对输入误差信号的要求,能确保倍频光 1.07 GHz 调制边带频率锁定在 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'=\text{CO}3-4$ 超精细能级跃迁频率上。

将对应于 ^{85}Rb 原子 $F=3\rightarrow F'=\text{CO}3-4$ 超精细能级跃迁的误差信号经 PID 处理后,反馈控制 1560 nm 种子激光器的内置 PZT,就可将对应于种子激光中心频率的倍频光 $+1$ 阶调制边带频率锁定到该超精细能级跃迁频率上。图 3(a)为对应于种子激光器自由运转和倍频光边带锁定下实测的误差信号幅度随时间的变化。在种子激光器自由运转时,由误差信号给定的频率分辨率,可得 10 min 内种子激光的频率漂移达 10 MHz,且实时抖动大。当倍频光调制边带锁定到 ^{85}Rb 原子的饱和吸收交叉共振峰后,误差信号变为一条直线,种子激光 $+1$ 阶调制边带频率在 15 min 内的漂移量降为 ± 150 kHz 以内,且经 5 h 持续监测,激光器均未失锁。

经 OC 的 60% 端口输出的 1560 nm 种子激光由两级 EY-DCF 放大器提升功率。为防止 ASE 的积累、确保输出 1560 nm 激光的信噪比和偏振度,第一级 EY-DCF 放大器的泵浦功率控制在 12 W,这时,1560 nm 激光输出功率为 2.3 W,信噪比和线偏振度分别达 63 dB 和 25 dB。第二级 EY-DCF 放大器中的增益光纤长度选为 3.8 m,其原因是,尽管选用更长增益光纤有利于提升 1560 nm 激光输出功率,但在强泵浦功率下,EY-DCF 泵浦输入端附近 Yb-波段 ASE 过高,容易引发自激振荡,从而反过来限制允许的最大泵浦功率,因此不宜采用过长的增益光纤。为此,本文采用了 1 μm 波段双波长辅助信号注入的方案,来抑制反向 Yb-ASE 自激的包层泵浦 EY-DCF 放大方案^[22],通过将双波长辅助信号的波长分别设置在 1030 nm 和 1040 nm,来抑制由 EY-DCF 非均匀增益加宽效应产生的 Yb-ASE 积累,以尽可能地增加允许的 980 nm 泵浦功率。实验发现,当双波长辅助信号注入功率均为 600 mW 时,3.8 m 增益光纤允许的泵浦功率达 40 W,1560 nm 激光输出功率最高,达 17.2 W,且无明显的 SBS 效应,因此,第二级 EY-DCF 放大器的增益光纤长度选为 3.8 m。这时,1560 nm 激光净输出功率达 12.8 W。该 12.8 W 的 1560 nm 激光经 PPLN-2 倍频,在最佳相位匹配温度下,产生的

780 nm 倍频光功率达 2.25 W, 对应的倍频效率高 17.6%, 这显然得益于 1560 nm 基频激光的高功率特性, 因为倍频效率与基频光的功率成正比^[26]。

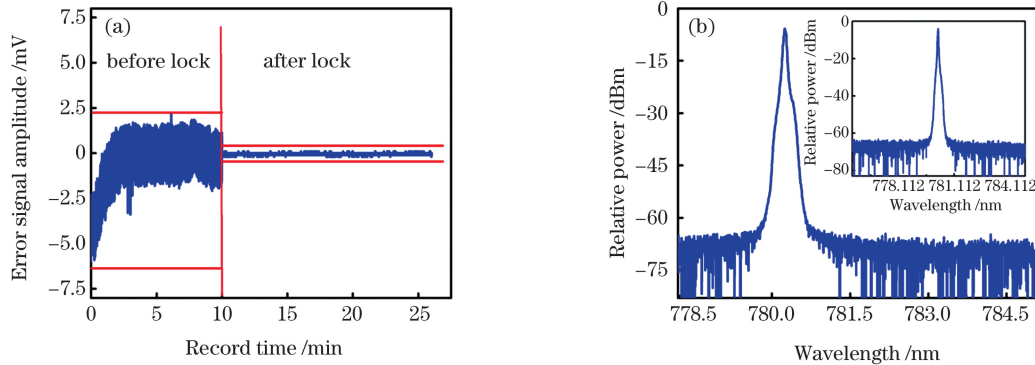


图 3 实验结果。(a) 当种子激光器自由运转和 780 nm 倍频光边带锁定时实测的误差信号幅度随时间的变化; (b) 测得的 2.25 W 的 780 nm 激光光谱, 插图为经 PPLN-1 倍频的 780 nm 激光光谱

Fig. 3 Experimental results. (a) Measured error signal amplitude changes with time when seed laser is free-running and frequency doubled 780 nm sideband is locked, respectively; (b) measured optical spectrum for 2.25 W high-power 780 nm laser, inset shows 780 nm laser spectrum measured before PPLN-1

图 4(a) 为采用标准延迟自外差方法在第二级 EY-DCF 放大器输出隔离器后测得的 12.8 W 的 1560 nm 激光稳频前后的线宽, 可见, 稳频前 3 dB 和 20 dB 线宽分别为 2.5 kHz 和 50 kHz, 略大于种子激光线宽 (1.25 kHz@3 dB), 而稳频后的 3 dB 和 20 dB 线宽则分别增加到 20 kHz 和 400 kHz, 即稳频导致种子激光线宽加宽。这是因为, 对应于 ^{85}Rb 原子 $F=3 \rightarrow F'=4$ 跃迁的饱和吸收峰的自然线宽约为 6 MHz, 远大于自由运转下的种子激光线宽, 而为获得最佳稳频效果, 又必须提供 PZT 反

馈环路增益, 导致了激光线宽展宽^[27]。虽然未直接测量该 780 nm 激光的线宽, 但是, 由于该 780 nm 倍频激光线宽约为其基频激光线宽的 2~4 倍^[3,26], 而 12.8 W 的锁定后的 1560 nm 基频激光 3 dB 线宽仅 20 kHz, 所以, 稳频后的 780 nm 倍频光的线宽不超过 80 kHz, 不仅如此, 得益于对光纤链路中熔接点的优化熔接等措施, 实测 780 nm 倍频光的线偏振度高达 23 dB, 由此可见, 这种高功率线偏振窄线宽的 780 nm 激光完全满足操控铷原子的应用要求。

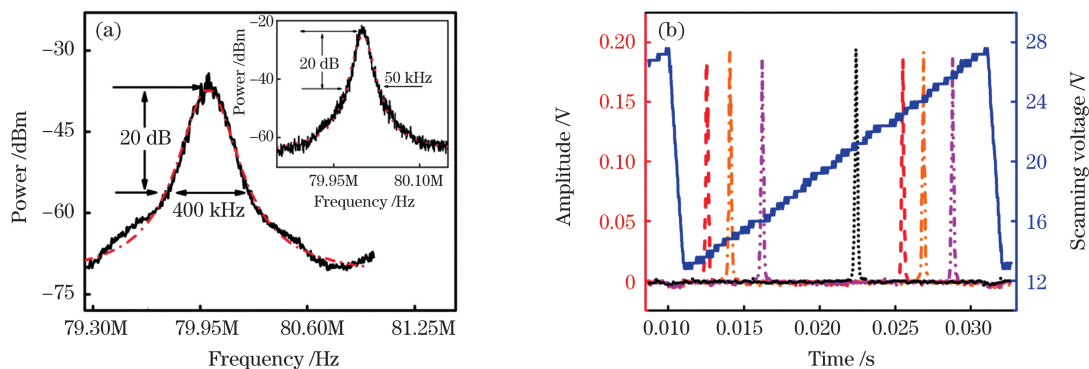


图 4 实验结果。(a) 实测的边带锁定后高功率 1560 nm 基频激光线宽 (实曲线为实测值, 虚曲线为洛伦兹拟合值), 插图为边带未锁定时的测量结果; (b) 扫描 EOM-1 微波调制频率时, 捕获记录下的高功率 1560 nm 基频激光中心频率的调谐特性

Fig. 4 Experimental results. (a) Measured linewidth of amplified 1560 nm fundamental frequency laser after sideband locking (solid curve is measured value and dash curve is Lorentz fitting value), inset shows measured result when sideband is not locked; (b) recorded center frequency tuning characteristics of amplified 1560 nm fundamental frequency laser during scanning the EOM-1 microwave modulation frequency

当倍频光+1阶边带保持锁定在 ^{85}Rb 原子交叉共振谱线($F=3\rightarrow F'=3$)上时,通过扫描加载到 EOM-1 上的微波频率,可以实现对高功率 780 nm 倍频光中心频率快速大范围频率调谐,以满足对 ^{87}Rb 原子 $F=2\rightarrow F'=3$ 跃迁谱线的频率扫描,获取不同频率的冷却激光。图 4(b)为扫描 EOM-1 微波调制频率时在第二级 EY-DCF 放大器输出端捕获记录下的 1560 nm 种子激光中心频率的调谐特性,所用法布里-珀罗(FP)扫描干涉仪的扫描范围为 1.5 GHz。可见,稳频后的 1560 nm 激光无跳模调谐范围远大于 1.2 GHz。需要指出的是,为适应扫描干涉仪测量,待测激光功率已大幅衰减到约 1 mW,加上扫描干涉仪及示波器记录响应等误差,导致图 4(b)中显示的纵模幅度变化大,而由功率计实测结果表明,以 10 ms 为周期的扫描过程中,基频光及倍频光功率基本保持不变。

通过对 EOM-2 施加 6.8 GHz 的微波调制信号,即可同时获得与对应于 ^{87}Rb 原子冷却光频率相隔 6.8 GHz 的再泵浦激光,且通过 EOM-1 对冷却光频率的扫描,该回泵激光的频率也可宽带扫描。在我们的样机中,预留了该 6.8 GHz 微波调制信号输入端口,因实验室无 6.8 GHz 微波信号源,故未进行相应测试。但是,由图 4(b)所示的宽带扫描特性,结合掺铒光纤放大器的宽带平坦增益特性,完全可以预期,只要对 EOM-2 施加 6.8 GHz 的微波调制信号,样机完全可以产生满足铷原子冷却应用要求的 780 nm 再泵浦激光。并且,由于 1560 nm 种子激光带有精密温控和 PZT 双重频率调谐机制,频率调谐量高达 50 GHz,因此,可以将激光器边带锁定到 ^{87}Rb 或 ^{85}Rb 的其他精细结构跃迁频率上,结合电光调制器,灵活地获取操控 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 原子的不同中心频率且宽带调谐的 780 nm 激光。

4 结 论

本文报道了自主设计研制的面向 Rb 原子精密测量应用的边带锁定 780 nm 高功率激光源样机。种子激光由自行研制的单个 1560 nm 线偏振 DBR 光纤激光器提供,具有低噪声和窄线宽特性,通过温度和内置 PZT 可实现 50 GHz 的频率精确可控调谐;采用双波长辅助信号注入抑制 Yb-ASE 的影响,有效提升了商用 975 nm 高功率 LD 包层泵浦的 EY-DCF 放大器对 1560 nm 线偏振窄线宽激光的放大效果,使得经 PPLN 晶体倍频后的 780 nm 激光功率高达 2.25 W。通过将倍频光的+1阶调制

边带锁定到 ^{85}Rb 原子的饱和吸收交叉共振峰,780 nm 激光在 15 min 内的频率漂移量在 ± 150 kHz 以内,且边带锁定后的高功率 780 nm 激光线宽不超过 80 kHz,线偏振度高达 23 dB。此外,该高功率 780 nm 激光可实现大于 1.2 GHz 的频率调谐,能实现在一台激光器上同时获得冷却光、再泵浦光及原子干涉相干操作激光。研制的 780 nm 高功率激光源已集成在 4U 标准机箱内,操作方便、可搬运,非常适合于 Rb 原子精密测量应用。

参 考 文 献

- [1] Leonard R H, Fallon A J, Sackett C A, et al. High-precision measurements of the ^{87}Rb D-line tune-out wavelength[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(5): 052501.
- [2] Letokhov V S, Minogin V G, Pavlik B D. Cooling and trapping of atoms and molecules by a resonant laser field [J]. *Optics Communications*, 1976, 19(1): 72-75.
- [3] Mugnier A, Jacquemet M, Le Mercier E, et al. High power single-frequency 780 nm fiber laser source for Rb trapping and cooling applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 82371F.
- [4] Yarovitsky A V, Prudnikov O N, Vasil'Ev V V, et al. Tunable frequency-stabilised laser for studying the cooling dynamics of Rb atoms in a magneto-optical trap[J]. *Quantum Electronics*, 2004, 34(4): 341-347.
- [5] Ren W, Sun Y, Wang B, et al. Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3607-3614.
- [6] Zhang X W, Zhong J Q, Tang B, et al. Compact portable laser system for mobile cold atom gravimeters [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6545-6551.
- [7] Yamada M, Ono H, Kanamori T, et al. Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.55- μm -band and a 1.58- μm -band Er^{3+} -doped fibre amplifier in a parallel configuration [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(8): 710-711.
- [8] Wang Q Y, Wang Z Y, Fu Z J, et al. A compact laser system for the cold atom gravimeter [J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 82-87.
- [9] Lévêque T, Antoni-Micollier L, Faure B, et al. A laser setup for rubidium cooling dedicated to space applications [J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(4): 997-1004.
- [10] Biedermann G W, Wu X, Deslauriers L, et al. Testing gravity with cold-atom interferometers [J].

- Physical Review A, 2015, 91(3): 033629.
- [11] Müller H, Chiow S W, Long Q, et al. Atom interferometry with up to 24-photon-momentum-transfer beam splitters[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(18): 180405.
- [12] Müller H, Chiow S W, Long Q, et al. Phase-locked, low-noise, frequency agile titanium:sapphire lasers for simultaneous atom interferometers [J]. Optics Letters, 2006, 31(2):202-204.
- [13] Wong A C L, Chung W H, Tam H Y, et al. Ultra-short distributed feedback fiber laser with sub-kilohertz linewidth for sensing applications[J]. Laser Physics, 2011, 21(1): 163-168.
- [14] Li C, Xu S H, Mo S P, et al. A linearly frequency modulated narrow linewidth single-frequency fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10 (7): 075106.
- [15] Theron F, Carraz O, Renon G, et al. Narrow linewidth single laser source system for onboard atom interferometry[J]. Applied Physics B, 2015, 118 (1): 1-5.
- [16] Legg T, Farries M. High power laser source for atom cooling based on reliable telecoms technology with all fibre frequency stabilisation[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1008: 100850Q.
- [17] Guo S L, Wang J M. Efficient generation of a continuous-wave, tunable 780 nm laser via an optimized cavity-enhanced frequency doubling of 1.56 μm at low pump Powers [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(1): 1-16.
- [18] Xu X F, Lu Y H, Zhang L, et al. Technical study of 8.7 W continuous wave single frequency green laser based on extra-cavity frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1101010.
许夏飞, 鲁燕华, 张雷, 等. 外腔谐振倍频 8.7 W 连续单频绿光技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1101010.
- [19] Thompson R, Tu M, Aveline D, et al. High power single frequency 780 nm laser source generated from frequency doubling of a seeded fiber amplifier in a cascade of PPLN crystals[J]. Optics Express, 2003, 11(14): 1709-1713.
- [20] Yang C S, Xu S H, Mo S P, et al. 10.9 W kHz-linewidth one-stage all-fiber linearly-polarized MOPA laser at 1560 nm[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12546-12551.
- [21] Fang J, Hu J G, Chen X, et al. Realization of a compact one-seed laser system for atom interferometer-based gravimeters [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1586-1596.
- [22] Wei S S, Yao B, Chen Y J, et al. Cladding-pumped erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier with dual-wavelength auxiliary signal injection of 1030 and 1040 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-9.
- [23] Bhattacharyya D, Dutta B K, Ray B, et al. Line shape simulation and saturated absorption spectroscopic measurement of Rb-D2 transition[J]. Chemical Physics Letters, 2004, 389(1/2/3): 113-118.
- [24] Han Y S, Wen X, Bai J D, et al. Laser frequency stabilization of 1560 nm laser after frequency doubling to 780 nm with a waveguide: radio-frequency frequency-modulation spectroscopy versus modulation transfer spectroscopy with Rb atoms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5):0530002.
韩亚帅, 温馨, 白建东, 等. 采用铷原子射频频率调制光谱与调制转移光谱对 1560 nm 激光经波导倍频至 780 nm 进行稳频的比较[J]. 光学学报, 2014, 34 (5):0530002.
- [25] Zhang X, Huang K K, Xu H, et al. A compact setup of saturated absorption spectroscopy for diode laser frequency stabilization [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(7): 074206.
- [26] Dong J Y, Dong J Y, Zeng X, et al. More than 20 W fiber-based continuous-wave single frequency laser at 780 nm[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35362-35367.
- [27] Wang X W, Xiang J F, Peng X K, et al. Light source of rubidium cold atomic clock based on fiber laser amplification and frequency doubling[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9):0914002
王新文, 项静峰, 彭向凯, 等. 基于光纤激光放大倍频的冷原子钟光源[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0914002.

Sideband-Locked High-Power 780 nm Laser Source for Precise Measurement Based on Rb Atoms

Wei Shanshan^{1,2}, Liu Yuanhuang^{1,2}, Chen Qunfeng³, Yao Bo², Zhang Ji^{1,2}, Zhou Lin³,
Mao Qinghe^{1,2*}

¹ School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

² Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³ Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

Abstract

Objective Because of the important applications of Rb atoms in precision measurement, the linearly polarized, narrow-linewidth, and frequency-stable 780 nm laser source which matches the D2 transition line of Rb atoms has recently begun to attract more attention. The linewidth of the 780 nm laser diode and the 1560 nm laser diode used for the frequency doubling of periodically-poled Lithium Niobate (PPLN) crystal both are in the order of MHz. Although the linewidth of the Ti : Sapphire laser is as narrow as kHz, it presents its own problems, such as large size, high cost, and difficulty of maintenance and transport, which greatly limit the practical use of high-precision atom interferometers. The 780 nm laser source-realized by the combination of techniques including power amplification of the narrow linewidth 1560 nm fiber by the erbium doped fiber amplifier (EDFA), frequency doubling by the PPLN crystal, and sideband locking, is currently the most promising candidate; however, its maximum power is only 1.2 W, presenting difficulty in meeting the requirements of the above applications. In this paper, a high-power 780 nm laser source prototype of our own design and development, with stable frequency, narrow linewidth, and high linear polarization, is presented. In addition, the cooling, repumping, and atomic interference coherent operation lasers can be simultaneously obtained by this prototype, which is convenient for precise measurement based on super-cold Rb atoms.

Methods The 780 nm laser source uses a single 1560 nm fiber laser with linear polarization, narrow linewidth, and broadband tunable frequency as its seed source. After the 1560 nm laser's power is boosted by the EDFA, the polarization-maintaining fiber coupler divides it into two parts. One part is frequency doubled by the waveguide-type PPLN crystal to stabilize the 1560 nm laser's frequency via saturation absorption spectroscopy; by using sideband-locking technology, the sideband frequency of the 780 nm laser is locked to the hyperfine transition of the ⁸⁵Rb atoms, and a wide range of frequency tuning can therefore be obtained. The other part is used as the signal light of the cladding-pumped erbium-ytterbium co-doped double-clad fiber (EY-DCF) amplifier used for power boost. The ytterbium band amplified spontaneous emission (Yb-ASE) during the amplification process can be effectively suppressed by dual-wavelength auxiliary signal injection technology, which subsequently increases the 1560 nm laser output power of the fiber amplifier. Finally, a high-power 780 nm laser output can be obtained due to the relatively high fundamental frequency optical power.

Results The saturation absorption spectroscopy of the Rb atom (Fig. 2) can be scanned by precisely adjusting the control temperature and PZT voltage of the seed laser. When the +1 order modulation sideband of the 780 nm laser is locked to the ⁸⁵Rb saturated absorption cross-resonant peak $F = 3 \rightarrow F' = 3$, the frequency of the 780 nm laser can be stabilized within 150 kHz (Fig. 3(a)) for a long time. By using sideband-locking technology, the frequency of the 780 nm laser can also be precisely tuned in a tuning range of 1.2 GHz (Fig. 4(b)). The 780 nm laser power generated by the PPLN crystal is as high as 2.25 W, benefiting from the improvement of the fundamental frequency light power. The signal-to-noise ratio of the 780 nm laser is as high as 60 dB (Fig. 3(b)), the linewidth is expected to be less than 80 kHz, and the measured linear polarization degree is as high as 23 dB.

Conclusions A sideband-locked high-power 780 nm laser source prototype designed and developed for Rb atom precision measurement applications is reported. The seed laser is a homemade single 1560 nm linearly polarized DBR

fiber laser. Dual-wavelength auxiliary signal injection technology is used to suppress the influence of the Yb-ASE, effectively improving the amplification effect of the cladding-pumped EY-DCF amplifier on the 1560 nm laser and making the 780 nm laser power up to 2.25 W after the 1560 nm laser has its frequency doubled by the PPLN crystal. By locking the sideband of the 780 nm laser to the saturated absorption cross-resonant peak of the ^{85}Rb atom, the frequency fluctuation of the 780 nm laser reaches about 150 kHz within 15 minutes, with linewidth less than 80 kHz and linear polarization degree as high as 23 dB. In addition, the frequency of the high-power 780 nm laser can be precisely tuned in a tuning range of 1.2 GHz, so the cooling, repumping, and atomic interference coherent operation lasers can be obtained simultaneously by a single laser source. The 780 nm high-power laser source has been integrated in a 4U standard box, which is convenient for handle and transportation, thus it is highly suitable for precise measurement based on super-cold rubidium atoms.

Key words lasers; fiber laser; super-cold rubidium atom; sideband lock; frequency tunable

OCIS codes 140.3510; 140.3515; 060.5060