

空间窄线宽激光器光学系统研究

张秀萍^{1,2,3}, 张林波^{1,2,3}, 刘军^{1,2,3}, 江晨晖^{1,2,3}, 许冠军^{1,3},
陈龙^{1,2,3}, 刘涛^{1,3*}, 张首刚^{1,3}

¹中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

摘要 空间窄线宽激光器作为空间锶光钟的本地振荡源, 决定了空间锶原子光钟的中短期稳定度。由于空间站的载荷资源有限, 空间窄线宽激光器光学系统既要满足空间光钟参考跃迁的功能要求, 又要考虑体积、重量等因素。此外, 由于空间窄线宽激光器系统对功耗、热耗都有严格的要求, 在激光源输出光功率一定的条件下提高系统光功率的利用率, 是保证后续光路光功率需求的关键。为了减小体积, 减轻系统重量, 采用小型化光学组件构建系统光路; 为提高系统光功率的利用率, 采用短焦双透镜方案, 在此基础上构建该光学功能单位的实验平台。结果显示: 声光调制器的单通衍射效率大于 90%, 双通衍射效率大于 70%。对声光调制器驱动信号进行扫描, 在 ± 20 MHz 扫描范围内, 光纤耦合效率变化了 50%, 基本满足了空间和功率上的应用要求。

关键词 激光器; 窄线宽激光; 声光调制器; 频率调谐带宽; 空间应用

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0414003

Optical System of Spatial Narrow Linewidth Laser

Zhang Xiuping^{1,2,3}, Zhang Linbo^{1,2,3}, Liu Jun^{1,2,3}, Jiang Chenhui^{1,2,3},
Xu Guanjun^{1,3}, Chen Long^{1,2,3}, Liu Tao^{1,3}, Zhang Shougang^{1,3}

¹National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China

Abstract Spatial narrow linewidth laser, as the local oscillation of the spatial strontium atomic clock, determines the short- and medium-term stability of the space strontium atomic clock. Due to the limited load resources of the space station, the optical system of spatial narrow linewidth laser not only meets the functional requirements of the space light clock reference transition, but also considers the factors of volume and weight. In addition, the space narrow linewidth laser system has strict requirements on the power and heat consumptions. Improving the optical power utilization efficiency under the condition that the output optical power of the laser source is constant is the key to ensure the follow-up optical path power demand. In order to reduce the volume and the weight of the system, we build the optical path of the system with the miniaturized optical components. To improve the utilization ratio of the optical power of the system, we build the experimental platform of the optical functional unit on the basis of the short focal two-lens scheme. The result shows that the single-pass diffraction efficiency of the acousto-optic modulator is greater than 90%, and the double-pass diffraction efficiency is greater than 70%. We scan the acousto-optic modulator drive signal. It is found that the optical fiber coupling efficiency changes by 50% within ± 20 MHz scanning range, which satisfies the space and power application requirements.

Key words lasers; narrow linewidth laser; acousto-optic modulators; frequency tuning bandwidth; space application

收稿日期: 2017-11-01; 收到修改稿日期: 2017-11-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0200200)、国家自然科学基金(11273024, 61025023)、国家重大科研仪器设备研制专项(61127901)、国家自然科学基金青年科学基金(11403031)、国家自然科学基金重大研究计划(91636101)

作者简介: 张秀萍(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事超窄线宽激光器方面的研究。E-mail: showpingzhang@163.com

导师简介: 张首刚(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事量子频标方面的研究。E-mail: szhang@ntsc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

1 引言

窄线宽激光具有极高的频率稳定性和光谱纯度,是精密测量的重要手段,在光钟^[1-2]、精密光谱学^[3]、引力波探测^[4]、测量基本物理定律^[5]、低噪声微波信号^[6]的产生、精密测量^[7]等领域具有极其重要的应用。在光原子钟中,窄线宽激光器作为本地振荡器,为光钟提供中短期稳定性,目前地面光钟的频率稳定性已经达到 10^{-18} 量级^[8-9]。原子钟性能的提高使其在空间科学研究中具有重大需求^[10],国际上相继开展了面向空间应用的原子钟研究计划^[11-13]。作为本地振荡器的窄线宽激光器,决定着空间光钟的中短期稳定性,因此设计与研制适应空间工作环境的窄线宽激光器也成为近年来国际空间科学研究的重要目标。

由于窄线宽激光系统的前沿性和复杂性,目前尚无空间环境实际应用的先例。正在开展的欧盟空间光钟(SOC2)二期实验项目设计的包括外腔半导体(ECDL)激光器在内的光学模块,搭建在 $600\text{ mm}\times 450\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的实验平台上,激光器输出的光通过光纤模式清洁后分为三束光,作为模块光源,光纤输出端的光功率为 15 mW ,稳定性为 $2.5\times 10^{-15}\text{ s}^{-1}$,但该项目目前还处于实验阶段^[14]。中国科学院上海光学精密机械研究所设计的空间激光冷却平台采用3台分布布拉格反射(DBR)激光器作为光源,采用柱面组合棱镜将激光器的输出光束缩至 $\Phi 0.25\text{ mm}$,声光调制器(AOM)的单通衍射效率超过70%,满足了激光冷却的要求^[10]。本研究的空间窄线宽激光器的光学部分只有一台激光器,光学组件的减少降低了平台的总质量和功耗,但却使系统的功能复杂化,光学长度增长,对光路指向稳定性的要求更为苛刻。此外,项目要求激光器具有较宽的扫频能力,采用双透镜设计方案,并使用小型化的光学组件构建实验平台,实现了大范围的调谐带宽。

2 光路设计

2.1 系统结构

空间窄线宽激光器主要包括激光器、光学单元、参考腔单元、控制单元、光纤相位噪声抑制(FNC)单元、功率稳定单元和用户单元(光学频率梳、光钟),总体组成结构如图1所示。光学单元基于PDH(Pound-Drever-Hall)稳频原理,激光器输出的

光经过电光相位调制器实现位相调制,经腔前光路后注入光学参考腔。光学参考腔结合主被动隔振、精密控温、前馈补偿等综合措施,为激光器系统提供激光频率基准。控制单元通过对比例-积分-微分(PID)控制器参数及相关链路的优化,将控制信号反馈给激光器,达到激光锁定的目的,最后将稳频后的激光信号传递给用户使用。光纤相位噪声抑制单元用来消除光纤的随机相位噪声,实现光纤输入光与输出光的相位相干性。功率稳定单元通过监测光学参考腔的透射信号光功率抖动,进一步提高窄线宽激光器输出光的频率稳定性。本研究侧重于主光路的光学设计研究,未涉及窄线宽激光器、光学参考腔单元及电学控制单元的设计研究。

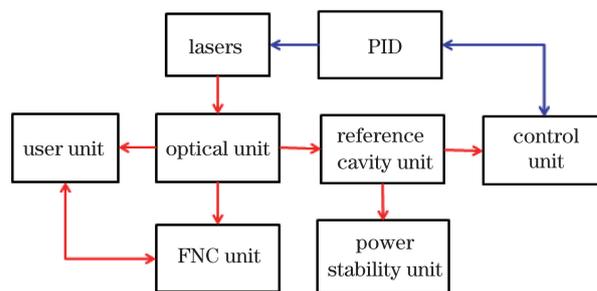


图1 空间窄线宽激光器总体结构图

Fig. 1 Structure of space narrow linewidth laser

2.2 主光路设计

与地面系统相比较,面向空间应用的窄线宽激光器系统的资源分配有限,光钟升空环境复杂,在轨运行空间环境苛刻,因此主光路既要满足空间光钟参考跃迁的功能要求,为光钟提供小于 1 Hz 的窄线宽激光光源,也要考虑体积、重量等因素,要求整体体积不大于 $420\text{ mm}\times 420\text{ mm}\times 450\text{ mm}$,质量不大于 75 kg 。另外,地面窄线宽激光器系统对功耗、热耗的要求相对宽松,后续光路的光功率需求可通过增加激光源输出光功率实现。而空间窄线宽激光器系统要求平均功耗不大于 108 W ,严格的功耗要求使得激光源的输出光功率有限。为保证后续光路的光功率要求,需要对主光路进行设计,以提高系统的光功率利用率。

采用小型化光学组件构建系统光路,可以减小体积,减轻系统重量。对于系统的功率利用率而言,光路中的光功率损耗包括AOM双通光功率损耗、光纤耦合效率、隔离器损耗以及元器件插入损耗。激光器输出的激光功率为 25 mW ,由隔离器和元器件引入的损耗为30%,为保证提供给用户的光功率

大于 6 mW, AOM 的衍射效率和光纤耦合效率要大于 60%。通常,在 AOM 前放置长焦透镜,可以获得良好的 AOM 衍射效率^[15],但增加了光路体积,占用了一定的空间资源。为更好地满足空间环境和资源分配的需要,压缩光路以提高系统效率,将地面系统中 AOM 使用的长焦透镜改用于短焦双透镜组,以提高 AOM 的衍射效率。此外,为提高锁频光路与光学参考腔之间以及激光稳频光信号与光钟、光学频率梳之间的单模光纤耦合效率,设计对应的扩束短焦双透镜组,以便更好地满足光学参考腔及光钟、光学频率梳等的功率需求。

空间窄线宽激光器主光路原理图如图 2 所示。整个光路分成两部分,分别布局在 356 mm × 336 mm × 34 mm 光路板(加筋结构)的正反面(A 面和 B 面),有效地利用光路板的空位位置集成

光学模块,减小空间体积和减轻重量。激光器输出的光经过短焦透镜组后经偏振分束镜(PBS)分成两束,一束光通过 AOM2 后到达 0° 反射镜,反射回来的光经过短焦透镜组进行光束变换后耦合进单模光纤,供光钟光谱测量和光学频率梳使用,其中 FNC 用来消除光纤的随机相位噪声;另一束光利用电光调制器(EOM)对激光的相位进行调制,调制后的激光经过腔前光路耦合透镜进入高精度光学参考腔内,光学参考腔的输出光(含反射光与透射光)被光电探测器(PD)接收,获得用于激光频率反馈的鉴频信号以及监测信号。鉴频信号输入到 PID 控制器后对激光器电流进行调制,实现激光频率的反馈控制,达到锁定激光频率的目的。图 2 中 AOM1 用来抵消由参考腔漂移引入的激光输出频率漂移, Osc 为本地振荡源, RAM 为剩余幅度调制。

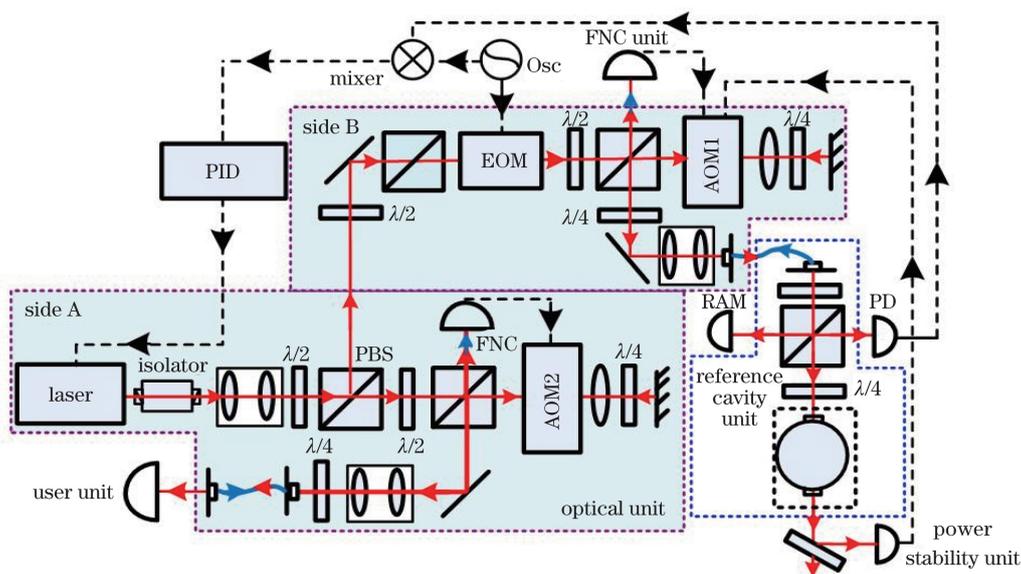


图 2 光路原理图

Fig. 2 Schematic of the optical path

如图 2 中 A 面光路所示, AOM 的通光孔径对光斑直径要求为 0.4 mm 左右,因此主光路采用短焦缩束透镜组,对激光器的输出光进行光束变换,使 $\Phi 1$ mm 的激光光束缩束至 $\Phi 0.4$ mm。同时,为了满足光钟或其他用户的光学频率需求, A 面光路需要具有光束移频的功能。B 面是基于 PDH 稳频技术的激光锁定光路,用以压窄激光线宽,获得稳定的激光频率输出,为空间铯原子光钟提供中短期频率稳定度。由于 A、B 面的光纤耦合双透镜的要求及实现的功能类似,因此仅具体介绍 A 面 AOM 配套光学系统的光学仿真以及实验测试结果,其结论也适用于 B 面光纤耦合双透镜。

3 光学仿真与实验测试

3.1 光学仿真

半导体激光器波长为 698.45 nm,输出功率为 25 mW,输出光斑直径为 1 mm。AOM 基于声光效应实现光束移频功能,广泛应用于激光器相位同步、光谱等领域^[16]。为了满足用户的光学频率需求, A 面光路放置两个 AOM, AOM1 用来抵消参考腔漂移引入的激光输出频率的漂移; AOM2 具有大范围扫频功能,用以满足光钟光谱测量需求。设计短焦双透镜组,使半导体激光器的输入光在通过 AOM 时,入射至 AOM 端口的光束束腰直径与 AOM 孔径相匹配,以达到最优的通过效率和衍射

效率。单元模块之间主要通过单模光纤进行光信号传递,为提高光纤耦合效率,采用短焦双透镜对激光器输出光束进行变换,使进入至光纤端口的光束直径为 1.6 mm,与光纤耦合器相匹配。围绕各功能单元对光束质量的要求进行光学仿真设计,以提高功能单元的效率。进行光学仿真设计时,需要考虑束腰直径与位置、光束准直性、光路体积和元件可调节范围等因素,结合实际进行仿真设计。

根据光路原理图(如图 2 所示)设计仿真了两种透镜组,一种是缩束透镜组,用来压缩激光器输出光斑(透镜组 1),另一种是放大 AOM 输出光斑的扩束透镜组(透镜组 2)。两种透镜组缩放的光斑直径不同,所成光束的准直性和束腰所在位置也不同。结合总系统分配的资源指标,设计要求如图 3 所示,图中所注光束距离为实际距离,单位是 mm。其中,AOM 处的束腰直径为 0.4 mm,光纤耦合器处的束腰直径为 1.6 mm。为提高光纤的耦合效率,要求扩束透镜组所成光束的瑞利距离大于 1000 mm。

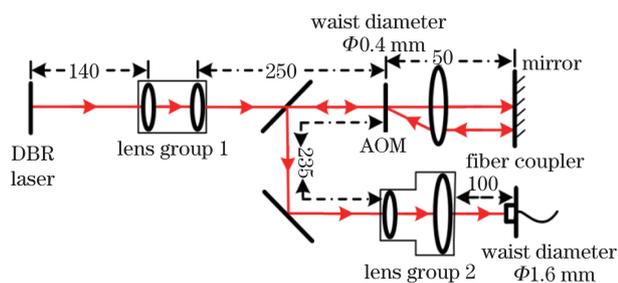


图 3 透镜组光学设计原理图

Fig. 3 Optical design schematic of lens group

根据透镜组光学设计原理图,利用光学物理软件设计缩束透镜组和扩束透镜组,通过设置透镜的焦距、物距,调整透镜间距等输入参数,获得相应的光学参数,软件仿真结果见表 1。缩束透镜组焦距 $f_1=11\text{ mm}$, $f_2=8\text{ mm}$,用来缩小激光器输出光斑;扩束透镜组焦距 $f_3=8\text{ mm}$, $f_4=20\text{ mm}$,用来放大 AOM 反射回来的输出光斑。由表 1 可以看出,缩束透镜组可以将激光器的输出光斑($\Phi 0.9\text{ mm}\sim\Phi 1\text{ mm}$)缩束至 $\Phi 0.4\text{ mm}$,束腰位置为 240~280 mm,实际光路中允许有 10~30 mm 的位置误差,与设计要求的 250 mm 束腰位置比较接近,因此该透镜组可以实现所需光束的变换要求。用焦距 $f_3=8\text{ mm}$, $f_4=20\text{ mm}$ 的扩束透镜可以将 $\Phi 0.4\text{ mm}$ 的光斑放大至 $\Phi 1.6\text{ mm}$,此时束腰位置距离透镜组 235 mm,双透镜处的光斑直径为 1.610 mm,准直距离大于 1000 m,满足设计要求。

表 1 透镜组软件仿真结果

Table 1 Software simulation results of lens group

Parameter	Laser beam compressor	Laser beam expander
Focal length /mm	$f_1=11, f_2=8$	$f_3=8, f_4=20$
Lens spacing /mm	19.16	28.01
Waist radius /mm	0.203	0.806
Waist position /mm	283	234.6
Rayleigh distance /mm	185.5	2922
Beam divergence /rmad	1.094	0.276

3.2 实验测试

为避免半导体激光器光束的不稳定性影响设计光路的实验验证与分析,结合实际测试条件,将软件设计得到的缩束透镜组更换为缩小光纤耦合头输出光斑为 $\Phi 1.580\text{ mm}$ 的透镜组($f_1=11\text{ mm}$, $f_2=6.24\text{ mm}$),两组透镜组的区别在于缩小得到的光斑束腰位置不一样,但都是将目标光斑缩至 $\Phi 0.4\text{ mm}$,以满足后续光路的需求。扩束透镜组采用设计好的透镜组($f_3=8\text{ mm}$, $f_4=20\text{ mm}$),基于这两组透镜搭建实验。

3.2.1 短焦双透镜实验

缩束透镜组实验结果与软件模拟结果如表 2 所示,焦距分别为 $f_1=11\text{ mm}$, $f_2=6.24\text{ mm}$ 的透镜组将 $\Phi 1.558\text{ mm}/\Phi 1.578\text{ mm}$ (x 轴/ y 轴)的光斑压缩至 $\Phi 0.42\text{ mm}$,束腰位置与软件模拟结果较为吻合,束腰直径与软件模拟结果比较一致。由于透镜架加工精度有限,且透镜焦距较小,两个透镜的轴向位置难以对齐,故而导致输出光束的两个轴向直径不同。

表 2 缩束透镜组实验结果与软件模拟结果

Table 2 Simulated and experimental results of laser beam compressor

Parameter	Simulation	Experiment	Relative error /%
Lens spacing /mm	17.32	17	1.8
Waist position /mm	383	380	0.8
Waist diameter / μm	425	423/470	5.1

到达扩束透镜组的衍射光斑直径为 $0.62\text{ mm}/0.67\text{ mm}$ (x 轴/ y 轴), $f_3=8\text{ mm}$, $f_4=20\text{ mm}$,软件模拟结果与实验结果如表 3 所示。经对比后发现,腰斑直径比较一致,束腰位置也比较吻合。实验室环境复杂,测试空间有限,因此未对透镜的瑞利距离进行极限测试。当前测得该透镜组的瑞利距离为

1130 mm,满足项目中大于 1000 mm 瑞利距离的要求。此外,扩束透镜组的输出光斑轴向直径存在一定偏差,原因是软件给出的光斑是理想光斑,实验中无论是缩小透镜组还是放大透镜组,透镜焦距均较小,透镜架加工精度有限,所以透镜的轴向调节难度大,从而影响光束的腰斑位置和腰斑直径。因为扩束透镜组是基于缩束透镜组所成光斑进行相应的光束变换,在缩小透镜组光束变换存在一定误差的条件下,必然会对放大透镜组的光束变换产生一定影响。

表 3 扩束透镜组的仿真结果与实验结果
Table 3 Simulated and experimental results of laser beam expander

Parameter	Simulation	Experiment	Relative error / %
Lens spacing /mm	28.01	27	3.6
Waist position /mm	234.63	254	8.3
Waist diameter /mm	1.62	1.58/1.62	1.1
Rayleigh distance /mm	2922	1130	

3.2.2 AOM 衍射实验

1) AOM 处腰斑大小与衍射效率

AOM 的通光孔径对光斑要求为 $\Phi 0.4$ mm 左右,通过调节缩束透镜组,改变入射至 AOM 处的光斑大小,得到了 AOM 腰斑直径与衍射效率的关系,如图 4 所示。图中的腰斑直径 x/y 表示 x 轴向与 y 轴向的光斑直径,单通衍射效率表示的是一级衍射光功率与 AOM 关闭时 AOM 输出光功率之比。当入射至 AOM 的光斑直径为 0.433 mm 时,一级衍射效率大于 92%。对于轴向光束存在一定偏差的主要原因有两个:一是入射进缩束透镜组的光束并不是理想光斑(x 、 y 轴上的光斑直径分别为 1.558, 1.578 mm);二是透镜架的加工精度有限,透镜直径比较小,若要实现严格的共轴,调节难度较大。后续会通过设计透镜共轴调节套筒来实现简单方便的共轴调节。

2) AOM 单通衍射效率

在实验 1) 的基础上进行 AOM 单通衍射实验。AOM 放置在缩束透镜组所成光束的束腰位置,此处的腰斑直径为 0.433 mm,调节 AOM,使 +1 级衍射效率最大。如图 5 中正方形散点所示,对 AOM 扫频,扫描范围为 20~125 MHz。得到的单通衍射效率随频率的变化结果显示:频率为 80 MHz 时,衍射效率最大,达到 92.7%,半峰全宽为 50 MHz。图 5 中的三角形散点表示的是 +1 级衍射光经扩束

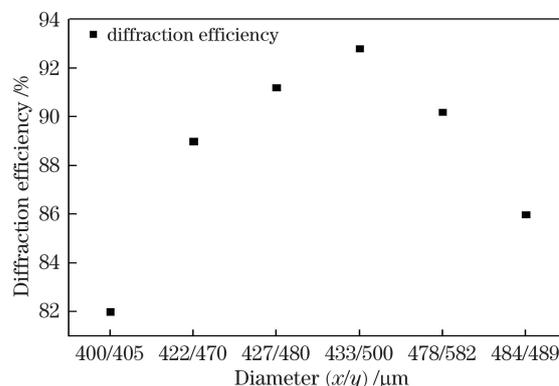


图 4 腰斑直径与衍射效率的关系

Fig. 4 Relationship between waist diameter and diffraction efficiency

透镜组后耦合进入光纤,并扫描频率,耦合进入光纤的单通衍射光的光束指向随扫描频率的变化比较明显,5 MHz 范围内的光功率下降了 50%。为使光束指向性随频率变化不明显,采用双通衍射光耦合进入光纤,以实现大范围扫频功能。

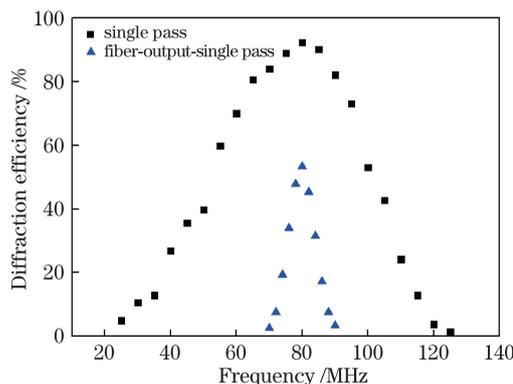


图 5 AOM 单通衍射效率随扫描频率的变化

Fig. 5 Variation of AOM single pass diffraction efficiency with scanning frequency

单通+1 级衍射光耦合进入光纤的耦合效率为 60%。实验中,当 AOM 的 +1 级衍射光最大时,对应的 +1 级衍射光斑直径为 0.62 mm/0.78 mm,该衍射光斑是扩束透镜组的输入光,其与扩束透镜组设计要求的输入光束直径(0.62 mm/0.62 mm)存在一定偏差,导致扩束后的光束直径为 1.58 mm/1.7 mm(单模光纤的理想输入光斑直径为 1.6 mm/1.6 mm),从而影响了光纤的耦合效率。

3) AOM 双通衍射效率

为降低光束指向性随频率变化的敏感度,采用猫眼结构^[15]改善调谐带宽。将 +1 级衍射光两次经过 AOM,并调节 0° 反射镜,使双通衍射效率最大,采用扫描频率方式,得到了双通衍射效率随频率变化曲线,如图 6 中红色圆形散点所示。随后将该衍

射光经扩束透镜组后耦合进入光纤,并对光纤输出的双通衍射光扫描频率,得到的双通衍射效率随扫描频率的变化如图6中粉色下三角形散点所示。对比两条曲线,在80 MHz频率处,光纤输出的双通衍射效率半峰全宽为40 MHz,与未耦合进入光纤的双通衍射效率的半峰全宽几乎相同。同时,与光纤输出的单通衍射效率相比(下三角形散点),调谐带宽由10 MHz提高至40 MHz,有效降低了光束指向性随频率变化的敏感度,提高了调谐扫描范围。值得注意的是,对于双通衍射,光束两次经过AOM,因此实际的调谐带宽是曲线半峰全宽的两倍,对应的实际带宽为80 MHz。在图6中,从左向右的散点分别表示20~125 MHz扫频范围内,单通衍射效率、双通衍射效率、光纤输出的双通+1级衍射光效率和光纤输出的单通+1级衍射光效率随扫描频率的变化。

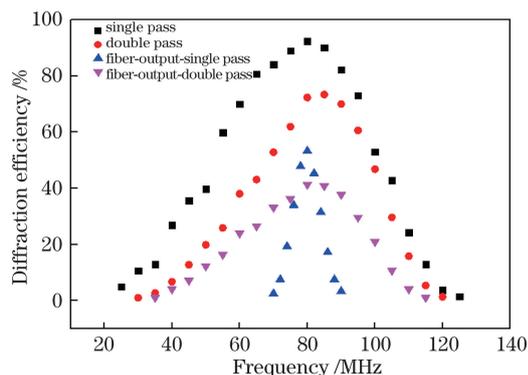


图6 AOM衍射效率随扫描频率的变化曲线

Fig. 6 Variation of diffraction efficiency of AOM with scanning frequency

经过光学仿真与实验测试证明了设计的空间主光路可以实现项目要求的光路设计指标,可以满足空间资源分配的需要。该主光路采用短焦双透镜方案,AOM的双通衍射效率大于70%,光纤耦合效率为60%,提高了系统效率,实现了80 MHz的大范围调谐功能,满足了光钟光谱测量的需求。

4 结 论

空间窄线宽激光器是空间铯原子光钟的重要组成部分,可为铯原子光钟提供中短期稳定度。介绍了698 nm空间窄线宽激光器光学系统设计思路与原理,采用双透镜方案,通过软件仿真及相应的实验平台,实现了功能复杂、光学长度更长的主光路光学设计。基于双透镜方案的AOM单通衍射效率可达到92.7%,双通衍射效率大于70%,实现了80 MHz大范围的扫频功能,满足了光钟光谱测量

的需求。使用小型化光学组件压缩光路尺寸,减轻光路板结构(带组件)的总质量至5.945 kg,满足了空间窄线宽激光器项目资源分配及主光路功能的要求,下一步将在光学平台上构建光学系统并开展力学实验与测试,以提高系统性能的稳定性和高精度空间原子光钟的发展以及推动新一代时间频率领域的发展与应用,促进其他基础科学研究领域的发展奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, *et al.* Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805-1808.
- [2] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, *et al.* Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place[J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1808-1812.
- [3] Cygan A, Lisak D, Maslowski P, *et al.* Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 063107.
- [4] Waldman S J. Status of LIGO at the start of the fifth science run[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23(19): S03.
- [5] Turyshev S G. Experimental tests of general relativity: Recent progress and future directions[J]. *Physics-Uspekhi*, 2009, 52(1): 1-36.
- [6] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F, *et al.* Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 425-429.
- [7] Jiao D D, Gao J, Deng X, *et al.* Application of narrow linewidth laser in precision measurement of optical resonator cavity length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112007.
焦东东, 高静, 邓雪, 等. 窄线宽激光在光学谐振腔长精密测量中的应用[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112007.
- [8] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, *et al.* Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6896.
- [9] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, *et al.* An atomic clock with 10^{-18} instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [10] Qu Q Z, Xia W B, Wang B, *et al.* Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6):

0602003.
屈求智, 夏文兵, 汪斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0602003.
- [11] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, *et al.* Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. Applied Physics B, 2006, 84(4): 683-690.
- [12] Lü D S, Liu L, Wang Y Z. Space cold atomic clock and its scientific applications[J]. Manned Spaceflight, 2011, 17(1): 47-51.
吕德胜, 刘亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用[J]. 载人航天, 2011, 17(1): 47-51.
- [13] Bongs K, Singh Y, Smith L, *et al.* Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS[J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 553-564.
- [14] Swierad D, Hafner S, Vogt S, *et al.* Ultra-stable clock laser system development towards space applications[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33973.
- [15] Donley E A, Heavner T P, Levi F, *et al.* Double-pass acousto-optic modulator system[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(6): 063112.
- [16] Tian H C, Song Y J, Ma C Y, *et al.* Timing and carrier envelope phase synchronization from two independent femtosecond lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801003.
田昊晨, 宋有建, 马春阳, 等. 两台独立飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801003.