

文章编号: 0258-7025(2010)02-0345-06

3 种方法实现 461 nm 外腔倍频激光器的锁定

彭 瑜¹ 赵 阳² 李 焯² 曹建平² 方占军² 臧二军²

(¹ 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084
² 中国计量科学研究院电学与量子科学研究所, 北京 100013)

摘要 采用基于一体化结构的环形倍频腔, 比较了 Hansch-Couillaud, Pound-Drever-Hall 和内调制 3 种锁定方法, 研究了不同倍频晶体长度和晶体内光束直径分布对倍频过程稳定性的影响。实验结果表明, 一体化腔结构有效提高了抗干扰能力和稳定性; 使用 3 种倍频腔锁定方法达到的倍频输出功率的稳定度为 3% (其中基频光功率漂移为 2%)。实验发现, 由于晶体对倍频光的吸收, 过长的晶体长度、过小的晶体内光束直径和不合适的光腰位置, 可明显影响倍频光的最大倍频功率和稳定性。实验得到的最大 461 nm 蓝光倍频输出功率 310 mW, 倍频效率 54.8%, 净倍频效率 71.3%。实验还比较了不同反射率输入耦合镜的耦合率。

关键词 激光器; 倍频; Hansch-Couillaud; Pound-Drever-Hall; 内调制

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0345

Three Methods to Lock the Second Harmonic Generation for 461 nm

Peng Yu¹ Zhao Yang² Li Ye² Cao Jianping² Fang Zhanjun² Zang Erjun²

(¹ Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² Division of Electricity and Quantum Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract This paper shows an external integrated ring cavity used to generate 461 nm blue radiation, which was locked by three different methods, Hansch-Couillaud, Pound-Drever-Hall, and intramodulation. And the factors the length of crystal and waist of fundamental light in crystal that affected the stability of output, were studied. The experimental results show that the integrated cavity improves the stability of output of 461 nm. And it reaches 3%, including 2% instability of fundamental. Because of absorption of 461 nm, long crystal, small waist and its disposition could impact their power and stability. And the output of second harmonic generation reaches 310 mW, 54.8% of the conversion efficiency, and 71.3% of the net conversion efficiency. The reflection ratio of coupling mirror was discussed in addition.

Key words lasers; frequency doubling; Hansch-Couillaud; Pound-Drever-Hall; intramodulation

1 引 言

超高稳定度和准确度的时间频率基准, 是众多物理量及物理常数中测量准确度最高的计量基本单位, 它决定着许多其他物理量和基本物理常数的定义及精度。而光钟的研究是构成可远优于传统微波频标的新一代时间频率基准的基础, 其中 Sr 原子光钟是光晶格钟^[1] 研究中备受关注并被多个研究组广为采用的元素之一。在 Sr 原子光钟的研究中, 塞曼 (Zeeman) 减速、第一步冷却都需要使用 ⁸⁷Sr, ⁸⁸Sr 的

¹S₀ - ¹P₁ 之间的 461 nm 谱线跃迁, 因此, 与该谱线对应的 461 nm 波长激光的制备成为光钟实验研究的第一步。

高质量 Sr 原子的冷却、俘获和囚禁, 对 461 nm 蓝光的开环功率水平、功率和频率稳定性均有较高的要求。国际上通常采用两种方案获得 461 nm 蓝光: 法国 BNM-SYRTE 实验室的 Courtillot 等^[2] 早期利用 170 mW 的 813 nm 激光与 900 mW 的 1064 nm 激光和频产生 115 mW 的 461 nm 激光, 效率 9%。之后, 由于大功率钛宝石激光器和锥形放大器 (TA) 的

收稿日期: 2009-03-25; 收到修改稿日期: 2009-05-11

基金项目: 国家 973 计划 (2005CB725401) 和国家科技支撑计划 (2006BAK03A20) 资助项目。

作者简介: 彭 瑜 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光频标方面的研究。E-mail: y-peng07@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 臧二军 (1955—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光频标及其测量方面的研究。E-mail: ejzang@nim.ac.cn

迅速发展,使得高功率基频激光的获得更为容易,从而使得更多的实验室得以采用倍频方案。德国 Max-Planck-Institute 的 Schwedes 等^[3]利用 922 nm 半导体激光器和锥形放大器,采用倍频外腔产生 200 mW 的 461 nm 激光,转换效率为 30.8%; Rice University 的 Saenz^[4]用同样方法得到 130 mW 的 461 nm 激光,转换效率 32%; 德国的 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) 研究所,采用相同方法得到 180 mW 蓝光,转换效率 60%; 法国 BNM-SYRTE 实验室的 R. Le Targat 等^[5]采用类似方法获得 234 mW 蓝光,净倍频效率达 75%(考虑了没有参与倍频的基频光和非出射腔镜透射出的倍频光损耗)。对于倍频腔的构成^[6~8]对倍频功率稳定性^[9~11]的影响、倍频晶体长度的选择和倍频腔的锁定方法比较,目前尚没有文献进行更为仔细研究和详细的讨论。

本文给出了使用周期性极化 KTP (PPKTP) 晶体,通过采用一体化的环形倍频腔对 922 nm 红外激光倍频。实验采用了一体化倍频腔结构;对两种不同长度的倍频晶体进行了比较;分别使用 Hansch-Couillaud^[12~14], Pound-Drever-Hall (PDH)^[15] 和内调制 (Intramodulation) 3 种方法对倍频腔进行锁定,同时测量输出 461 nm 光功率的稳定性。实验结果表明,一体化腔结构可以改进倍频腔的稳定性和抗干扰能力;对于存在晶体对倍频光吸收的情况,过长的晶体长度、过小的晶体内光束直径和不合适的光腰位置,可明显影响倍频光的最大倍频功率和稳定性;3 种倍频腔锁定方法中达到的最好倍频激光功率稳定度为 3%(其中基频光 922 nm 的功率漂移为 2%)。实验得到的最高 461 nm 蓝光功率为 310 mW,倍频效率 54.8%,净倍频效率 71.3%。实验还比较了反射率为 87%, 91% 的输入耦合镜,反射率为 91% 输入耦合镜在基频光输入 350 mW 时,其耦合率(耦合进倍频腔的那部分基频光所占的比重)可达 73%。

2 实 验

2.1 倍频腔

实验采用的基波光源为 Coherent 公司的可调谐掺钛蓝宝石激光器 (MBR-110),调谐范围为 700~1000 nm,922 nm 波长处的线偏振单频输出激光功率最大可达到 900 mW,基波 922 nm 激光经 $\lambda/2$ 波片和匹配透镜后进入倍频腔。半波片用于实现基波的线偏振方向与倍频腔和倍频晶体之间的偏振态

匹配。耦合透镜焦距为 500 mm,用于实现入射基波模式与倍频腔本征模之间的空间模式匹配。倍频腔与基频光源之间未加入光学隔离器,为了不产生直接的镜反射光反馈,实验采用了 bow-tie 形式的 4 镜环形倍频腔。为了获得非常稳定可靠的倍频激光输出,实验采用了一种一体化的倍频腔结构,即倍频晶体和 4 个腔镜调整架的定板由一整块金属材料加工的封闭壳体构成,而倍频晶体和 4 个腔镜调节架的动板被固定在这一封闭壳体内,这种一体化结构一方面有效减小了腔镜之间的相对运动,使得腔体对外界的音频和机械振动更为不敏感,又通过整个壳体的单独控温,避免了因外界环境温度变化而造成腔镜镜架形变,增加了腔的稳定性。环形腔由平面反射镜 M1, M2 和凹面反射镜 M3, M4 组成。反射镜 M1 兼作输入光的耦合镜,其腔内表面镀膜用于实现基频波腔内外光束的功率耦合,其透过率经过特殊选择,以实现“阻抗匹配”。反射镜 M2, M3 的腔内表面镀有对 922 nm 基频光的高反射膜,反射率为 0.998,其中 M3 的透射光用光电探测器 PD3 接收,作为倍频腔内调制锁定信号或倍频腔锁定状态监测;反射镜 M4 同时兼作倍频输出耦合镜,其腔内表面镀有双色膜,对基频光的反射率和倍频光的透过率分别为 0.997 和 0.980。反射镜 M3 和 M4 上附有压电陶瓷 (PZT),以分别进行腔的调制或扫描和反馈控制,实现倍频腔的跟踪或锁定。倍频晶体为 Israel 的 Raicol 公司生产的周期极化 KTP 倍频晶体,通光截面 1 mm \times 2 mm,设计光栅周期在 25° 时为 5.55 μm ,晶体对 922 nm 和 461 nm 的激光折射率分别为 1.8371, 1.9198,有效非线性系数为 7 pm/V,其损伤阈值为 100~200 MW/cm²,这一点限制了实验中输入 922 nm 基频光功率不宜过高。倍频晶体 PPKTP 采用独立控温,其光轴垂直晶体热沉表面放置,通过调节倍频晶体的温度,以实现最佳准相位匹配。此外,晶体的两端面均镀有对基频光和二次谐波的增透膜,基频光透过率优于 0.995,倍频光透过率为 0.995。由 M4 腔镜输出的 461 nm 倍频激光经焦距为 45 mm 的透镜准直后送入 Sr 原子光钟系统,用于 Sr 原子光钟的 Zeeman 减速和一级冷却。

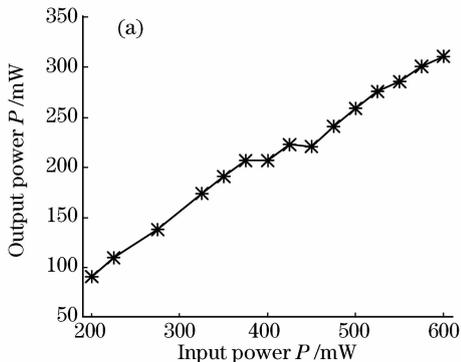
实验对两种不同长度的 PPKTP 晶体进行了倍频。首先使用长度 30 mm 的倍频晶体,这时采用的凹面镜的曲率半径为 106 mm,凹面镜之间距离为 132 mm,基频光入射光束在反射镜上的入射角为 3.4°,对应的倍频腔长为 561 mm,晶体内的束腰半

径为 $50\ \mu\text{m}$, 主要参数如表 1 所示。倍频腔的 461 nm 的最大输出功率和净倍频效率分别为 208 mW 和 73.3%; 实验发现当继续增大基频光时, 倍频光并不随之增大, 其原因是晶体有较强的蓝光吸收, 吸收因子为 $0.108\ \text{cm}^{-1}$, 并且该吸收随着温度的增加迅速增大, 当晶体长为 30 mm 时, 晶体 461 nm 对蓝光的吸收占总入射光的 32.4%, 这限制了输出功率的进一步增加。

表 1 两个倍频腔的比较

Table 1 Difference between the two cavities

Remarks	Long cavity	Short cavity
Crystal length /mm	30	10
Cavity length /mm	561	236
Waist radius / μm	50	34
Input angle /($^\circ$)	3.4	5.7
Output power /mW	208	310
Net efficiency /%	73.3	71.3



为了提高 461 nm 输出, 实验选用较短的 10 mm 长度的晶体以减小 PPKTP 倍频晶体对蓝光的强吸收。为了弥补由于晶体的减短带来的倍频效率的降低, 使用了一个较小的倍频腔从而减小光在晶体内的束腰。倍频腔参数如表 1 所示。这时凹面反射镜 M3, M4 的曲率半径均为 45 mm, 基频光入射光束在反射镜上的入射角为 5.7° , 两个凹面反射镜 M3 与 M4 之间的距离为 54 mm, 倍频腔长为 236 mm, 对应的晶体内的束腰半径为 $34\ \mu\text{m}$ 。表 1 给出了两种不同长度 PPKTP 晶体倍频参数和结果的比较, 当采用 10 mm 倍频晶体时, 最大可获得 310 mW 的 461 nm 蓝光, 倍频效率 54.8%, 净倍频效率达 71.3%。图 1 为输出倍频光功率和净倍频效率随输入基频光功率的变化趋势图。实验表明, 选择长度更短的 10 mm 晶体, 在一定程度上减小了晶体对倍频光的吸收, 可获得比 30 mm 晶体更高的最大输出倍频光功率。

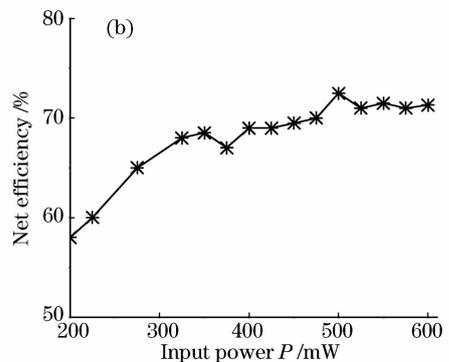


图 1 输出 461 nm 功率(a)和输出 461 nm 效率(b)随输入基频光功率的变化

Fig. 1 Output power of 461 nm (a) and efficiency of 461 nm (b) versus input power of fundamental frequency

实验通过设计两凹面反射镜距离 33 mm, 子午和弧矢方向上的光腰相等, 使得本征输出光斑为很好的基模; 又由于 PPKTP 为准相位匹配晶体, 无走离角, 所以输出倍频光呈现良好的空间模式, 如图 2 所示。实验采用了 Hansch-Couillaud, PDH, 内调制方法对倍频腔进行了锁定。为了得到更加稳定的倍

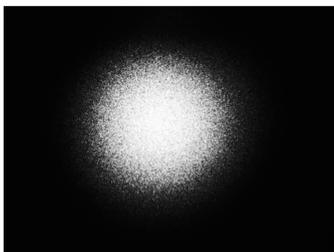


图 2 输出 461 nm 蓝光的横模

Fig. 2 TEM₀₀ of output

频光, 实验中把 PPKTP 晶体往 M4 方向偏移 1.25 mm, 使晶体内的光腰位置向 M3 腔镜方向移动, 偏离晶体中心 2.06 mm。这时的最大倍频效率和功率有所降低, 但输出功率更为稳定。得到 161 mW 的 461 nm 蓝光, 倍频效率为 46%, 净倍频效率 68%。

实验中先后使用了两种基频光反射率的 M1 腔镜, 反射率分别为 87% 和 91%。图 3 为其输入耦合效率的比较, M1 的耦合率随输入基频光功率的增加而增大。M1 的反射率为 91%, 基频光输入 350 mW 时, 其最高耦合效率可达 73%; M1 的反射率为 87%, 基频光输入 350 mW 时, 其耦合效率可达 65%。即反射率为 91% 的 M1, 其阻抗匹配更好。

2.2 3 种锁定方法

2.2.1 Hansch-Couillaud 锁定

首先采用 Hansch-Couillaud 锁定方法, 实验原

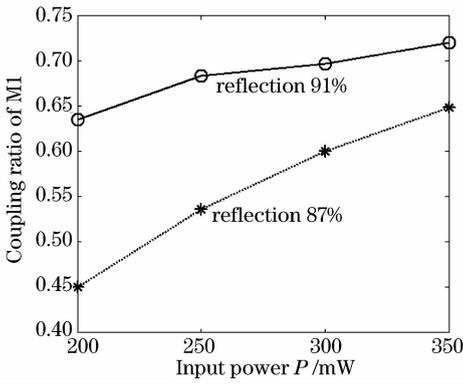


图 3 M1 耦合效率随输入 922 nm 功率曲线

Fig. 3 M1 coupling ratio versus input power of 922 nm
 理如图 4 所示,由反射镜 M1 的直接反射光和腔内基频光经 M1 的透射光组成的总反射光束通过 $\lambda/4$ 波片后,被偏振分束器 (PBS) 分离成两个偏振方向的光,分别被光电二极管 D1 和 D2 进行差分探测,其误差信号经高压放大后反馈到安装在反射镜 M3 的压电陶瓷上,该压电陶瓷用于倍频腔长的扫描和

控制。通过压电陶瓷的伸缩调节腔长,使激光频率与倍频腔共振频率梳中的某一频率一致,腔内基波光功率由于谐振作用而获得增强,其增强比可达到几十倍(小信号的倍频效率近似与晶体内功率密度的平方成正比),实现倍频腔与激光器之间的跟踪与锁定,保持倍频腔一直处于谐振状态,产生稳定的高功率 461 nm 输出。

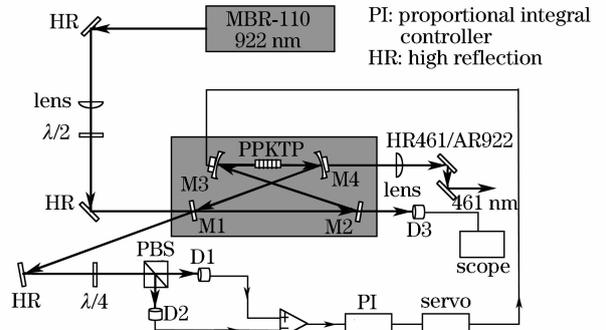


图 4 Hansch-Couillaud 锁定实验装置图
 Fig. 4 Schematic of Hansch-Couillaud setup

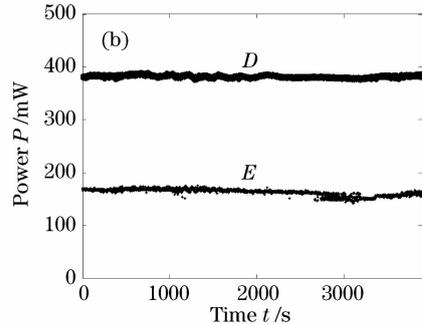
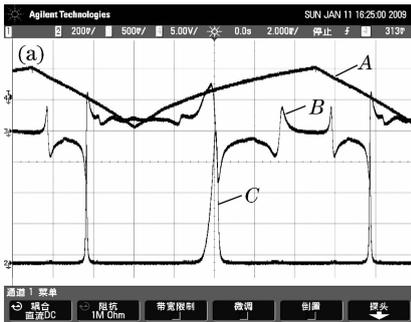


图 5 (a) Hansch-Couillaud 锁定时的误差信号;(b) 基频光和倍频光功率的稳定性测量

Fig. 5 (a) Error signal with Hansch-Couillaud; (b) the stability of fundamental and doubling light

图 5(a)曲线 A 为加在 M3 上压电陶瓷的锯齿波扫描信号,曲线 B 为锯齿波扫描状态下差分探测所得的误差曲线,曲线 C 为探测器 D3 所探测到的腔共振模式。图 5(b)为使用 Hansch-Couillaud 方法锁定后,输出倍频光功率和基频光的测量,曲线 D 为基频光的功率,曲线 E 为倍频光的功率。在 4000 s 锁定时间内,倍频光的功率稳定性可达 3%,其中包含基频光 922 nm 功率的漂移 2%。这种锁定方法的优点是:所需的电路比较简单,由一部分光路代替电路产生鉴频曲线;无需加调制,输出的倍频光功率更加稳定。但也存在一些缺点:由于无需加调制,使得误差曲线含有噪声信号,信噪比不高,如图 5(a)所示,这就要求在实验中消除和隔离噪声;另外,这种锁定方法的调节过程较为复杂。实验过程中还注意到当晶体束腰过小时,不能对腔进行很好

的锁定,其原因为过小的束腰使其产生严重的热透镜效应和双稳态现象。

2.2.2 Pound-Drever-Hall 锁定

实验还采用了 PDH 方法进行锁定,锁定原理

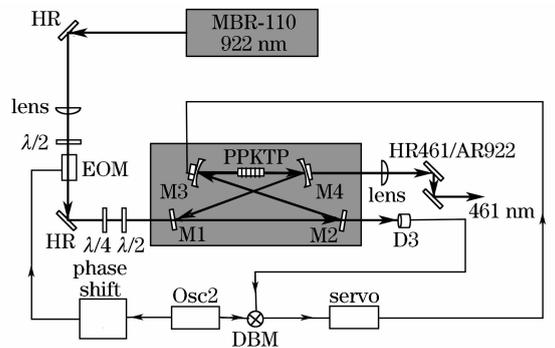


图 6 PDH 实验装置原理图

Fig. 6 Schematic of PDH method setup

如图 6 所示。掺钛蓝宝石激光器输出的基频 922 nm 线偏振光, 经过 $\lambda/2$ 波片和匹配透镜后, 通过电光相位调制器 (EOM) 进行相位调制, 然后进入倍频腔。本振 Osc2 输出的频率为 20 MHz 的调制信号的一路通过合适的移相, 送入 EOM, 将调制信号加在基频光上, 另一路送入双平衡混频器 (DBM) 的本振端 LO, 高速探测器接收到的射频信号经过合适的放大后送入 DBM 的射频端 RF, 与 Osc2 的

本振信号进行混频, DBM 混频后的中频信号 IF 经过比例积分调理后产生合适的误差信号, 经高压放大后反馈到安装在反射镜 M3 的 PZT 上, 实现倍频腔与激光器之间的跟踪与锁定。实验中由于基频光偏振方向与 EOM 所加电场方向并不完全一致以及 KNbO_3 晶体品质并非完美, 基频光经电光晶体后, 其偏振态发生改变, 故在其加入 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片用作偏振调节, 使之与 PPKTP 偏振匹配。

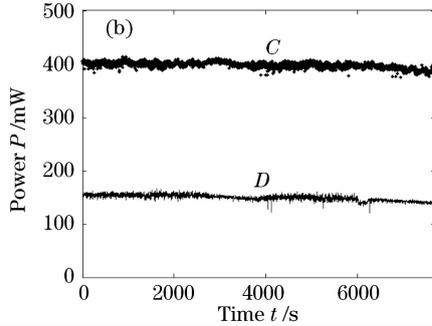
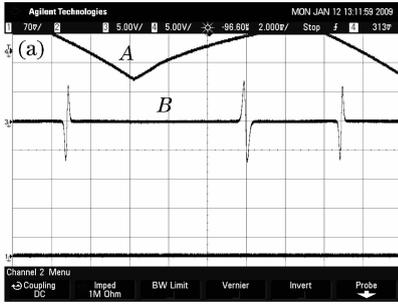


图 7 (a) PDH 锁定时的误差信号; (b) 基频光和倍频光功率的稳定性测量

Fig. 7 (a) Error signal with PDH method; (b) the stability of fundamental and doubling light

图 7(a) 曲线 A 为加在 M3 上 PZT 的锯齿波扫描信号, 曲线 B 为高速探测器接收到的射频信号与 Osc2 的本振信号进行混频的误差信号。图 7(b) 为 PDH 方法锁定时, 输出倍频光功率和基频光的测量, 曲线 C 为基频光的功率, 曲线 D 为倍频光的功率。在 8000 s 锁定时间内, 倍频光的功率稳定性可达 3%, 其中包含基频光 922 nm 功率的漂移 2%。这种方法显著的优点是: 输出倍频光稳定性较好; 由于 20 MHz 调制, 所以可以在混频之前很好地隔离低频噪声, 提高信噪比, 更好地对腔进行锁定。存在缺点为: 需要加高频调制信号, 锁定电路要求高, 相对复杂。

理如图 8 所示。基频 922 nm 线偏振光, 经过 $\lambda/2$ 波片和匹配透镜后, 耦合进入倍频腔。倍频腔的反射镜 M4 上安装有用于调制的 PZT, 该压电陶瓷的相应频率可以到达 100 kHz。Osc1 产生的调制频率为 62.5 kHz 的正弦调制被分为两路, 其中一路经过合适的移相后, 送入反射镜 M4 上的调制 PZT 倍频腔进行调制, 另一路送入双平衡混频器 DBM 的本振端, 光电探测器 D3 探测到的信号经过适当放大后送入 DBM 的射频端, 与 Osc1 的本振信号进行混频, 其混频后的中频信号由 DBM 的 IF 端输出, 然后反馈给 M3 上的用于控制的压电陶瓷, 实现倍频腔锁定。

2.2.3 内调制锁定

实验中也使用了内调制方法进行锁定, 锁定原

图 9(a) 曲线 A 为加在 M3 上 PZT 的锯齿波扫描信号, 曲线 B 为锯齿波扫描状态下内调制锁定时光电探测器 D3 探测到的信号经过适当放大与 Osc1 的本振信号进行混频所得的误差曲线, 曲线 C 为探测器 D3 所探测到的腔共振模式。图 9(b) 为用内调制方法锁定时, 输出倍频光功率和基频光的测量, 曲线 D 为基频光的功率, 曲线 E 为倍频光的功率。在 7000 s 锁定时间内, 倍频光的功率稳定性可达 5%, 其中包含基频光 922 nm 功率的漂移 2%。这种方法的优点是: 锁定过程简单, 由于在腔上加了调制信号, 所以有较好的信噪比, 能消除锁定过程中的低频噪声。其不足之处为: 由于在腔内加了调制信号, 所以输出倍频光也相应地加了调制, 使得输出倍频光

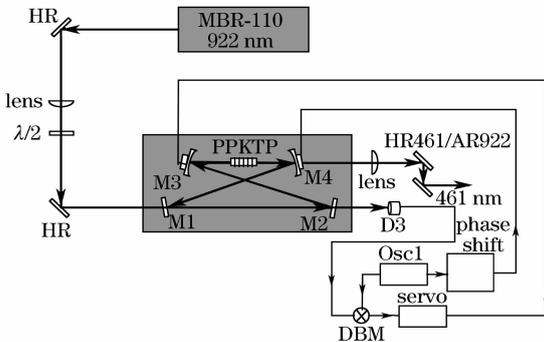


图 8 内调制方法的实验原理图

Fig. 8 Schematic of intramodulation method

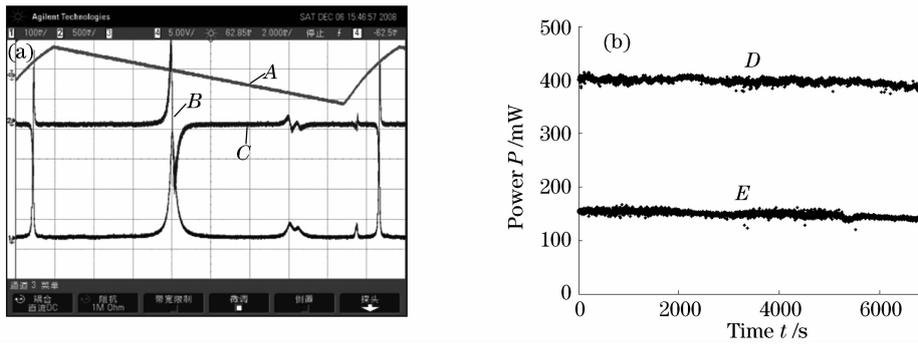


图9 (a) 内调制锁定时的误差信号;(b) 基频光和倍频光功率的稳定性测量

Fig.9 (a) Error signal with intramodulation method; (b) the stability of fundamental and doubling light

表2 3种锁定方法的比较

Table 2 Comparison of the three methods

Method	Stability (shift of fundamental)	Circuit	Manipulation	Modulation
Hansch-Couillaud	3%(2%)	Low frequency	Complex	None
PDH	3%(2%)	High frequency	Simple	20 MHz
Intromodulation	5%(2%)	Low frequency	Simple	62.5 kHz

不稳定。

总结3种锁定方法,得到它们的特点,如表2所示。

3 结 论

实验设计了一个 bow-tie 环形一体化倍频腔,对晶体长度、晶体的位置、输入耦合镜的基频光反射率以及倍频腔长的选择进行了讨论;采用 Hansch-Couillaud, PDH, 内调制3种锁定方法很好地锁定了倍频腔,得到了足够的功率和很好的基模,功率稳定性达3%(基频光的漂移为2%),为 Sr 原子光钟 Zeeman 减速和第一步冷却奠定了基础。

倍频腔腔镜 M1 的反射率和倍频晶体长度的进一步优化,有可能更有利于倍频效率的提高;而增加基频光的稳定性,同时对倍频腔体进行隔声隔振处理,有望进一步增加锁定后的倍频功率的可靠性和稳定性。采用声光调制器对倍频功率进行稳定,可获得更高级别的功率稳定性。

参 考 文 献

- 1 M. Takamoto, F. Hong, R. Higashi *et al.*. An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, **435**:320~324
- 2 I. Couillot, A. Quessada, R. P. Kovacich *et al.*. Design of a cold atom source for a neutral strontium optical frequency standard [C]. *IEEE*, 2002, 220~221
- 3 C. Schwedes, E. Peik, J. Von Zanthier *et al.*. Narrow-bandwidth diode-laser-based blue and ultraviolet light source [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(2):143~147
- 4 A. D. Saenz. 461nm laser for studies in ultracold neutral strontium [D]. Houston: Rice University, 2005. 54
- 5 R. Le Targat, J. J. Zondy, P. Lemonde. 75%-efficiency blue

- generation from an intracavity PPKTP frequency doubler [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**(4-6):471~481
- 6 Zang Erjun, Cao Jianping. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):335~340
- 臧二军,曹建平. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的 532 nm 激光[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):335~340
- 7 Wang Xubao, Wu Qiang, Chen Jimin *et al.*. Study of beam quality and focus of frequency doubling in a KTP crystal on Nd:YAG laser by the resonant external ring cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1169~1172
- 王旭葆,武强,陈继民等. KTP 晶体环形腔外腔倍频 Nd:YAG 激光光束特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1169~1172
- 8 Dong Jingxing, Lou Qihong, Cheng Xusan *et al.*. 480 nm blue laser by direct frequency doubling of laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):567~570
- 董景星,楼祺洪,成序三等. 半导体激光直接倍频的 488 nm 蓝光激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):567~570
- 9 G. D. Boyd, D. A. Kleinman. Parametric interaction of focused Gaussian light beams [J]. *Appl. Phys.*, 1968, **39**(8):3597~3639
- 10 Y. Kaneda, S. Kubota. Theoretical treatment, simulation, and experiments of doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(30):7766~7775
- 11 Y. Asakawa, H. Kumagai, K. Midorikawa *et al.*. 50% frequency doubling efficiency of 1.2-W cw Ti:sapphire laser at 746 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **217**(1):311~315
- 12 T. W. Hansch, B. Couillaud. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity [J]. *Opt. Commun.*, 1980, **35**(3):441~444
- 13 H. R. Telle, D. Meschede, T. W. Hansch. Realization of a new concept for visible frequency division; phase locking of harmonic and sum frequencies [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10):532~534
- 14 A. Hemmerich, D. H. McIntyre, C. Zimmermann *et al.*. Second-harmonic generation and optical stabilization of a diode laser in an external ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7):372~374
- 15 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2):97~105