

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.01

半导体激光器稳频综述

贡昊, 王宇, 白金海, 胡栋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 在冷原子干涉实验中需要用激光冷却并操控原子, 因此对半导体激光器频率的稳定性要求较高。由于半导体激光器本身线宽较大, 功率稳定性差, 还可能产生慢漂和跳模等现象, 故需对半导体激光器进行稳频。本文介绍了饱和吸收谱稳频、波长调制稳频、调制光谱稳频、调制转移光谱稳频、双色激光稳频、频率电压转换稳频 6 种冷原子干涉实验中常用的稳频方法, 分别阐述了各方法的原理、特点、适用领域, 为半导体激光器的实际应用提供了参考。

关键词: 半导体激光器; 稳频; 线宽; 调制

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0001-07

Review of Semiconductor Laser Frequency Stabilization

GONG Hao, WANG Yu, BAI Jinhai, HU Dong

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In cold atom interference experiments, the atoms need to be cooled and manipulated by laser, so the frequency stability of semiconductor lasers is required. Because of the large line width, poor power stability, slow drift and mode hopping, it is necessary to stabilize the frequency of semiconductor lasers. This paper introduces six common frequency stabilization methods in cold atom interference experiments, including saturated absorption spectrum stabilization, wavelength modulation frequency stabilization, modulation spectrum frequency stabilization, modulation transfer spectrum frequency stabilization, two-color laser frequency stabilization and frequency-voltage conversion frequency stabilization. The principles, characteristics and application fields of these methods are described respectively, which provide reference for the practical application of semiconductor lasers.

Key words: semiconductor laser; frequency stabilization; line width; modulation

0 引言

激光器具有高相干性、高亮度和高方向性的特点, 在医疗、工业、航空航天等领域应用广泛。随着科技的不断发展, 半导体激光器被越来越多的实验所采用。与其他种类的激光器相比, 半导体激光器具有体积小、衍射效率高、成本较低等优点, 目前已广泛应用于激光光谱、原子分子物理、量子频标、原子核物理等研究领域。半导体激光器通过电子和空穴的复合受激发射出光子产生激光, 当有超过阈值的电流注入激光二极管时, 半导体工作介质中粒子数反转, 在谐振腔中对一定频段的光产生增益, 当增益大于损耗时, 半导体激光器就会输出激光^[1-9]。不同温度下半导体激光器的能隙宽度不同, 而且在不同温度作用下激光二极管的等效内腔长度也不同; 注入电流会影响半导体激光器内部电子和空穴的浓度, 进而影响电子和空穴复

合时产生的激光。因此可以通过改变激光二极管的工作温度和注入电流情况来控制输出激光的频率^[10-19]。单模激光二极管自由运转时典型线宽约为几十兆赫, 对于冷原子干涉等精密实验而言过大, 因此通常在激光二极管外部加一个光学色散元件光栅, 光栅把一部分输出光反馈回激光器, 等效于改变了激光器的谐振腔长度, 对半导体激光器输出的激光进行了重新筛选。采用光栅重新对激光器输出频率进行筛选的外腔式半导体激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL)主要有 Littrow 和 Littman 两种结构, 将激光投射到闪耀光栅上, 一级衍射光反馈回激光二极管进行“模式竞争”, 零级衍射光作为输出光束, 可以将激光器的输出激光线宽压窄到 1 MHz 或者更低, 但是 ECDL 输出的激光有慢漂和跳模现象, 几个小时之内有可能会漂移几吉赫^[20], 因此必须对外腔式半导体激光器进行主动稳频。

对 ECDL 稳频的主要思路是：以原子的特定吸收谱线所提供的稳定性较好的频率作为参考标准，把输出的激光频率与参考频率相对比，产生误差信号，再通过伺服电路系统（PID 控制器）将误差信号负反馈到激光器的注入电流和 PZT 上，进而控制激光器的频率，最后实现稳频。主动稳频不仅可以提高频率变化的阿伦方差，还可以使激光器的线宽变窄。

1 半导体激光器的内调制稳频方法

1.1 饱和吸收光谱稳频

饱和吸收光谱（Saturated Absorption Spectra, SAS）稳频技术利用波长为 780 nm 可调谐激光照射铷池，由于铷池中的原子进行布朗运动，不同速度的原子与激光的相对运动不同，因此运动的原子感受到的激光频率会发生变化，即具有一定速度分布的原子会相对激光产生多普勒频移，由于激光的频率对应铷池中速度为零的原子的共振频率，因此铷池中速度为零的原子会与激光相互作用，对激光进行饱和吸收，形成饱和吸收光谱。铷原子饱和吸收光谱曲线如图 1 所示。

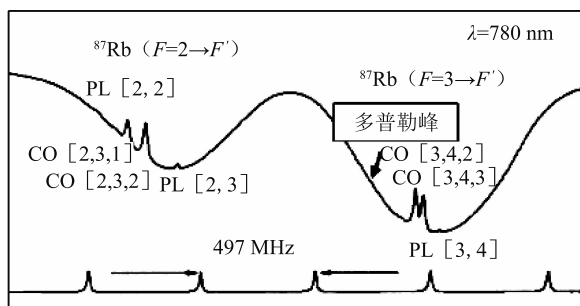


图 1 铷原子饱和吸收光谱

外腔式半导体激光器产生的激光经过光隔离器后通过半波片，再经过 PBS 分束后，透射光作为主要输出激光，反射光经过一个较厚的分束镜，透射过分束镜的激光功率较大，作为泵浦光，在分束镜前后表面反射的激光功率相对较小，作为探测光。泵浦光与其中一路探测光在铷池中对射产生饱和吸收光谱，经过光电探测器后将光信号转换成电信号，并且与另外一路探测光做差，可以消除铷池中由于不同速度原子的相对运动所产生的多普勒本底噪声。将经减法器处理之后得到的电信号连到示波器上，即可观测到 Rb 原子的饱和吸收谱信号。饱和吸收谱稳频光路图如图 2 所示。

以铷原子为例，当激光频率处于某一对超精细能

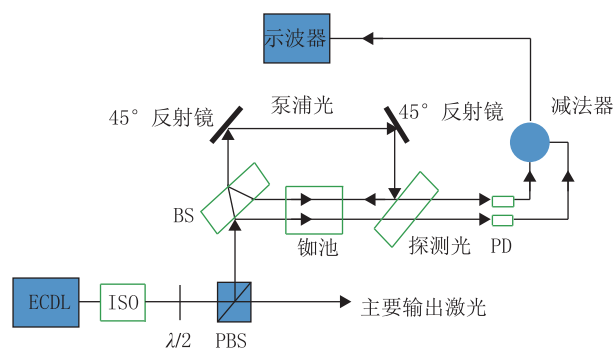


图 2 饱和吸收谱稳频光路图

级共振频率处，由于兰姆凹陷效应会产生饱和吸收峰，当激光频率为两个原子超精细能级中间位置对应的吸收频率时，由于原子与激光之间存在相对运动，也会产生饱和吸收谱的交叉峰，因此⁸⁷Rb 原子的 D2 线跃迁有三个饱和吸收峰和三个交叉共振峰，如图 3 所示。

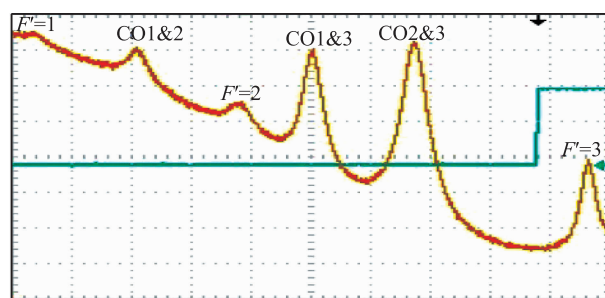


图 3 ⁸⁷Rb 原子 $5^2S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}$

1.2 波长调制锁频

波长调制锁频（Dither Locking）与饱和吸收光谱类似，属于饱和吸收谱稳频方式的拓展，在 PZT 的基础上增加了几千赫的声频调制，这样经过铷池之后的饱和吸收光谱信号也携带着声频调制信号的信息，将这个声频调制信号送进锁相放大器作为参考信号，锁相放大器将参考信号与经过铷池的饱和吸收谱信号进行比较，即可获得激光器与原子饱和吸收谱线的锁定位置之间的误差信号，将误差信号输入 PID 控制器，最后反馈到激光器的 PZT 和注入电流上，实现激光器的稳频。波长调制锁频的饱和吸收信号和误差信号曲线如图 4 所示，光路图如图 5 所示。

波长调制锁频的优点是成本比较低，激光稳频效果也能稳定在锁定点的百千赫量级附近。但是这种稳频方式属于内调制稳频，即将调制信号直接加在激光器上，会引入额外的频率噪声和强度噪声。

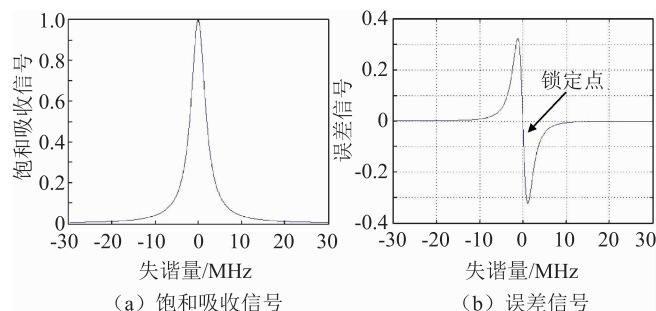


图4 波长调制锁频饱和吸收信号和误差信号曲线图

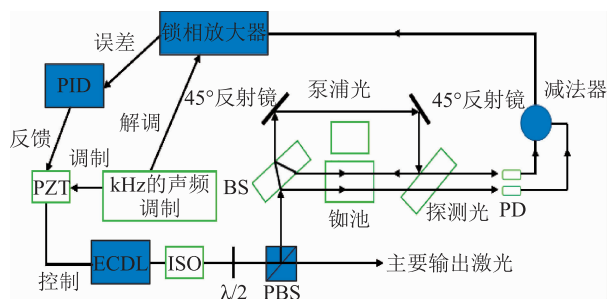


图5 波长调制锁频光路图

2 半导体激光器的外调制稳频方法

2.1 调制光谱稳频

调制光谱(Pound Drever Hall Scheme, PHD)利用高频射频源对电光调制器(Electro Optical Modulator, EOM)进行调制,使得经过铷池的饱和吸收谱信号携带高频射频源的频率信息,由于雪崩二极管(APD)检测出的是高频交流成分,因此用分束器将光路分离出一部分,经过普通的光电二极管(PD)进入示波器观测饱和吸收谱信号。最终高频射频源在移相器的作用下调整相位,与携带饱和吸收谱的调制信号一同进入混频器解调得到类色散的误差信号,经PID反馈到激光器的注入电流和PZT上,最终实现稳频。调制光谱光路图如图6所示。

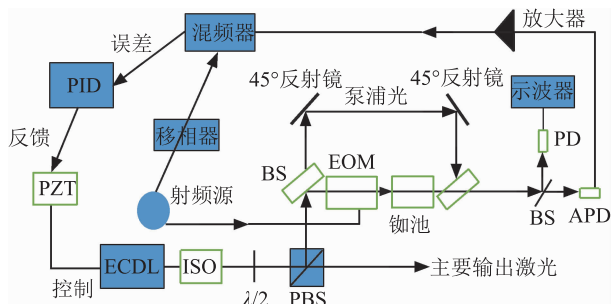


图6 调制光谱光路图

调制光谱稳频方式属于外调制,其优点是调制频率未加在激光器的PZT和注入电流上,因此不会将调制频率本身的噪声和误差在激光器里进行放大而对激光器的频率稳定性产生影响,而且误差信号斜率很大,可以获得很好的频率准确度,对于频率偏差非常敏感。但是EOM和EOM的驱动射频信号源比较昂贵,成本相对较高。PDH误差信号图^[21]如图7所示。

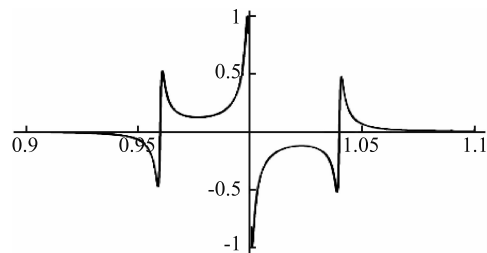


图7 PDH误差信号图

2.2 调制转移光谱稳频

调制转移光谱(MTS)通过压控振荡器(VCO)驱动的声光调制器(Acousto Optical Modulator, AOM)对泵浦光进行频率调制,被调制的泵浦光频率成分中包含泵浦光的中心频率 ν 和 ± 1 阶边带(二阶以上不考虑),两个边带频率的泵浦光与相向传输的探测光在铷池中铷原子的非线性效应下产生四波混频过程,因此加载在泵浦光的调制信号可以转移到不加调制携带饱和吸收谱信号的探测光上来,最终在锁相放大器中得到激光器与原子跃迁谱线之间的类色散误差信号,通过PID反馈到激光器的PZT和注入电流上,最终实现激光器的稳频^[22-24]。调制转移光谱光路图如图8所示。

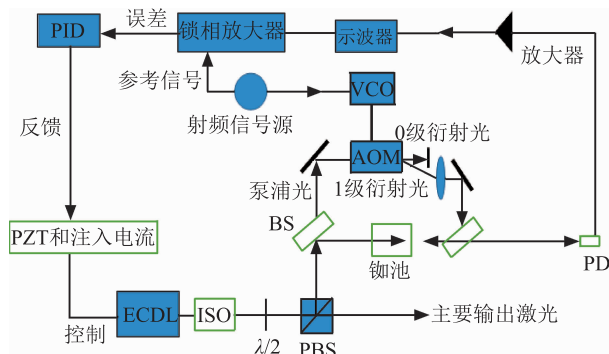


图8 调制转移光谱光路图

VCO频率稳定性相对较差一些,因此可以将VCO替换成直接数字合成器(Direct Digital Synthesis, DDS),例如采用33600A型直接数字合成器来驱动AOM。另外如果采用厚玻璃片代替BS产生两束探测光,再分别用两个探测器对探测光进行检测,经差分放大后,送

入锁相放大器即可消除铷池中的多普勒本底噪声, 激光器的稳频效果更好。

调制转移光谱的稳频方式也属于外调制, 即并不对激光器本身进行频率调制, 减少了直接调制激光器产生的频率噪声和强度噪声。通常采用 EOM 的正负一级边带代替 AOM 衍射光进入铷池发生四波混频, 但是这种方法会提高实验成本。总的来说, 调制转移光谱有着非常平的零背景信号, 误差信号斜率较大, 稳频效果好, 频率线漂小, 很容易将激光器的频率锁定在原子超精细跃迁谱线附近^[25-28]。因此目前大部分实验室都采用调制转移光谱来实现稳频。

3 半导体激光器的不加调制稳频方法

3.1 双色激光稳频

双色激光稳频(Dichroic Atomic Vapour Laser Lock, DAVLL)利用磁场环境下原子对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光吸收效果的不同, 将得到的两种饱和吸收谱线做差, 根据做差后的误差信号来进行稳频^[29-33]。

当原子暴露在外界磁场环境中时, 由于塞曼分裂导致吸收谱线的左旋光和右旋光频率产生位移。在铷池外侧绕上线圈, 给线圈供电时, 线圈会产生铷池轴向均匀磁场。线偏振光可以等效为两个圆偏振光的叠加, 当磁场为零时, 左旋圆偏振光和右旋圆偏振光不产生频移, 在此条件下吸收光谱是重合的。当磁场不为零时, 由于左旋光和右旋光激发态下的原子跃迁方向相反, 使左旋和右旋光谱信号位置产生相向偏移, 左旋偏振光的吸收谱线向频率减小的方向移动; 右旋偏振光的吸收谱线与左旋相反。将两路信号进行差分运算即可得到在指定饱和吸收峰处对应频率过零的类色散误差信号^[34-36]。由于左旋光和右旋光产生相向等量的频率偏移, 因此差分放大得到的误差谱线信号仍然是关于中心频率对称的。消多普勒双色谱如图 9 所示。

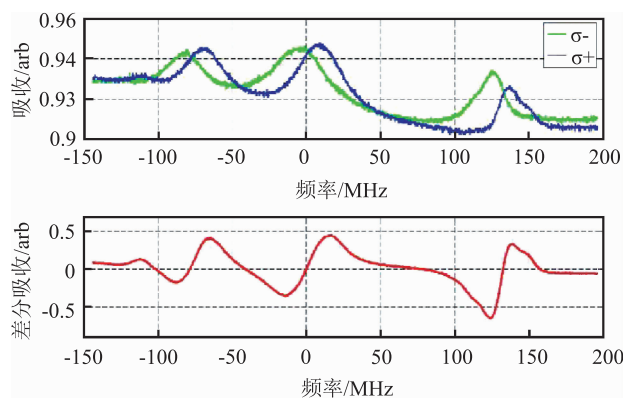


图 9 消多普勒双色谱

得到误差信号后, 利用 PID 控制器实现激光器的频率被锁定在系统原子超精细谱线所对应的绝对频率上, 达到稳频的目的。双色激光稳频光路图如图 10 所示。

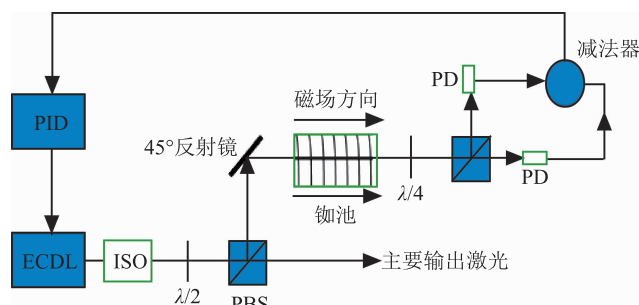


图 10 双色激光稳频光路图

DAVLL 稳频的优点: ①光路简单, 对激光的功率要求低; ②自动捕获范围较宽, 可达 500 ~ 800 MHz; ③具有很高的稳定性, 不易失锁。④结构易组建, 磁场只需要几十高斯, 在铷池外缠绕线圈就可以实现, 反馈系统中采用差分放大器即可, 不需要额外添加锁相放大器。但是 DAVLL 稳频也存在不足: ①容易受到外界环境因素干扰; ②由于误差信号斜率很小, 锁定点的频率不是很准确。因此对这种方法进行了改进^[37-40], 在 DAVLL 的基础上增加一束泵浦光, 利用饱和吸收效应消除探测光的多普勒展宽, 可以明显提高稳频锁定点测量的准确度。消多普勒双色激光稳频光路图如图 11 所示。

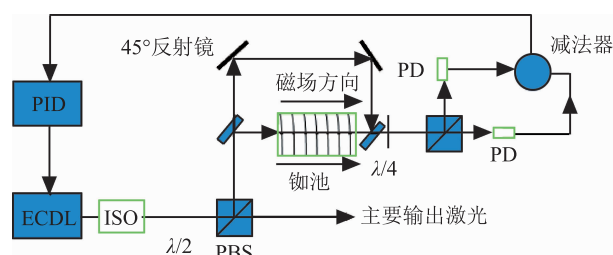


图 11 消多普勒双色激光稳频光路图

3.2 频率电压转换稳频

半导体激光器稳频通常除了将频率锁定在稳定的参考频率(原子的高稳定性特征跃迁谱线、高 Q 值的法-珀腔的透射峰中心)上之外, 也可以锁定在另外一个已经进行稳频的参考激光器上^[41-42]。主要方法是将两台激光器进行拍频, 用光电二极管探测拍频频差信号, 将光信号转换成电信号, 通过放大器后, 与标准

参考信号源一同输入混频器，得到了与标准参考信号源频差的频率信号，之后通过频率-电压转换器(Frequency to Votage Converter, FVC)将频率信号转换成电压信号。通过控制电压对输出信号进行主动调整，并将得到的误差信号反馈到 PID 板上，最后反馈到激光器的控制电流和 PZT 上，实现稳频。频率-电压转换稳频光路图如图 12 所示。

频率-电压转换稳频的优点是两台激光器的频差完全可调，可通过控制电压信号对两台激光器的频差进行实时控制。参考激光器的稳频效果越好，待锁激光器的稳频效果就会越好。但是这种稳频方式需要增加一台参考激光器，成本昂贵。

4 小结

本文介绍了 6 种冷原子干涉实验中常用的稳频方

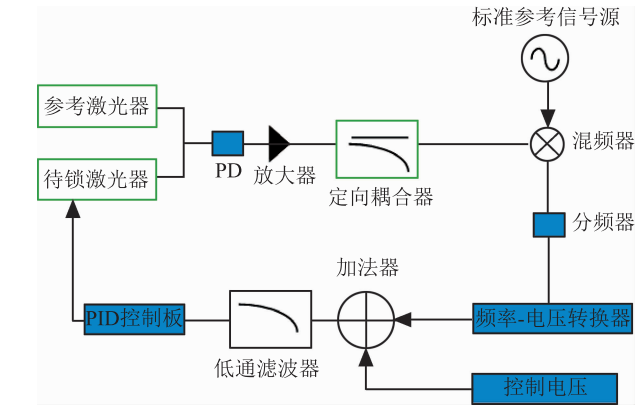


图 12 频率-电压转换稳频光路图

法，其特点对比如表 1 所示。
这 6 种方法中，饱和吸收谱稳频和波长调制稳频法属于半导体激光器内调制稳频,光路简单、实验

表 1 冷原子干涉实验中常用的稳频方法对比

稳频方法	稳频优点	稳频缺点	应用场合	与其他方法对比
饱和吸收谱稳频	光路简单，实验成本低	调制信号引入额外噪声	稳频效果在稳定点百千赫附近，准确度要求不高的实验均可	内调制稳频
波长调制稳频	光路简单，实验成本低	调制信号引入额外噪声	稳频效果在稳定点百千赫附近，准确度要求不高的实验均可	内调制稳频
调制光谱稳频	误差信号斜率大，背景信号影响小	EOM 及驱动射频信号源比较昂贵	稳频效果在稳定点 1 kHz 附近，AOM 移频后激光频率的检测	外调制稳频
调制转移光谱稳频	调制转移光谱有着非常平的零背景信号，误差信号斜率较大，稳频效果好，频率线漂小，易锁定	需要锁相放大器。如果采用 EOM 方案实验，成本比较高，可以采用 AOM 方案，频率稳定性也能得到保证	稳频效果在稳定点 1 kHz 附近甚至，在几百赫左右，误差信号斜率大，稳频效果非常好，频率线漂小，冷原子实验中冷却光和拉曼光对激光频率稳定性要求较高，可以采用	外调制稳频
双色激光稳频	光路简单，对激光功率要求低，自动捕获范围大，不易失锁	误差信号斜率比较小，锁定点的频率不是很准确。	稳频效果在稳定点百千赫附近，对于实验准确度要求不高的实验可以采用，例如利用激光测距	未加调制稳频
频率电压转换稳频	不仅可以实现稳频功能，还可以实现锁相功能。	需要增加一台具有稳定频率的参考激光器，主要实现光学锁相环功能	操控冷原子干涉的两束拉曼光可以通过这种方式进行稳频和锁相	未加调制稳频

成本较低，但是调制信号直接加在半导体激光器上，会引入额外的频率噪声和强度噪声，稳频效果能稳定在锁定点的百千赫量级附近；调制光谱稳频方法和调制转移光谱稳频方法属于外调制稳频，调制信号不直接加在半导体激光器上，不会引入额外的频率噪声和强度噪声，而且误差信号斜率大，背景信号影响小，

稳频效果能稳定在锁定点的 1 kHz 量级附近，稳频效果最佳，因此被广泛的用于冷原子干涉实验中激光器的稳频上；双色激光稳频利用塞曼效应得到类色散误差信号，光路电路实现简单，磁场也只需要几十高斯，但是容易受到外界因素的影响，而且误差信号斜率较小，锁定点频率不是很准确，容易产生慢漂，稳频效

果能稳定在锁定点的百千赫量级附近,对于稳频准确度要求不是很高的实验可以采用这种方法;频率电压转换稳频将半导体激光器的频率锁定在一个具有稳定频率的参考半导体激光器上,由于冷原子干涉实验中需要的操纵原子团分束合束的拉曼光是由主、从拉曼光两束光组成的,这两束光需要频率相差 6.834 GHz,相位差一定,通常采用这种方式实现光学锁相环的功能,同时实现稳频。

5 展望

由于不同类型的实验对激光质量和稳频效果要求不同,还有一些其他的稳频方法^[43-45]没有进行详细介绍,比如塞曼稳频、声光调频等。外腔式半导体激光器稳频结果直接影响激光对原子的作用效果,未来将会对激光器频率稳定性提出更高的要求。同时随着激光器本身的完善,激光器的稳频方法也会继续向高准确性、高效率、低成本、低功耗的方向发展。为了达到更好的稳频效果,需要深入开展微加工技术和电路集成技术的研究,以实现稳频系统的小型化甚至芯片化;同时应进一步利用软硬件结合技术的高稳定性优势,实现激光频率的长时间自动锁定,匹配相关光学实验的高可靠性应用要求。

参 考 文 献

- [1] 王义遒. 原子的激光冷却与陷阱[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [2] 孙步梁. 高分辨率原子干涉重力测量实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [3] Stern G, Battelier B, Geiger R, et al. Light-pulse Atom Interferometry in Microgravity[J]. The European Physical Journal D - Atomic, Molecular and Optical Physics, 2009, 53(3): 353 - 357.
- [4] Zhou M K, Hu Z K, Duan X C, et al. Experimental Progress in Gravity Measurement with an Atom Interferometer[J]. Frontiers of Physics in China, 2009, 4(2): 170 - 173.
- [5] 徐周翔. 冷原子干涉实验的激光频率以及过程的自动控制[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- [6] Hardman K S, Everitt P J, McDonald G D, et al. Simultaneous Precision Gravimetry and Magnetic Gradiometry with a Bose-Einstein Condensate: A High Precision, Quantum Sensor[J]. Phys. rev. lett, 2016, 117(13): 138501.
- [7] 吴彬. 高准确度冷原子重力仪噪声与系统误差研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
- [8] 韩顺利. 拉曼脉冲型原子干涉仪的基础研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [9] Gou J L, Mehlst T E, Kim J, et al. Limits to the Sensitivity of a Low Noise Compact Atomic Gravimeter[J]. Applied Physics B, 2008, 92(2): 133 - 144.
- [10] Muhammad R, Ramirez-Serrano J, Magalh K M F, et al. Efficiency in the Loading of a Sodium Magneto-optical Trap From Alkali Metal Dispensers[J]. Optics Communications, 2008, 281(19): 4926 - 4930.
- [11] 吴琼. 高准确度绝对重力仪关键技术研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.
- [12] Cheinet P, Santos F P D, Petelski T, et al. Compact Laser System for Atom Interferometry[J]. Applied Physics B (Lasers and Optics), 2006, 84(4): 643 - 646.
- [13] 段小春. 原子干涉重力梯度测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [14] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [15] Gou J L, Cheinet P, Kim J, et al. Influence of Lasers Propagation Delay on the Sensitivity of Atom Interferometers[J]. European Physical Journal D, 2007, 44(3): 419 - 425.
- [16] Bertoldi G, Lamporesi L, Cacciapuoti M, et al. Atom Interferometry Gravity-Gradiometer for the Determination of the Newtonian Gravitational Constant G[J]. The European Physical, 2006, 40(2): 271 - 279.
- [17] 张红伟. 水下重力场辅助导航定位关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [18] 江晓. 冷原子量子存储中的激光稳频与锁相技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [19] Nyman R A, Varoquaux G, Lienhart F, et al. I. C. E.: A Transportable Atomic Inertial Sensor for Test in Microgravity[J]. Applied Physics B, 2006, 84(4): 673 - 681.
- [20] 张璋. 半导体激光器的稳频稳相以及在原子光学中的应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2009.
- [21] Internal Working Note of the LIGO Project. [EB/OL]. <http://www.ligo.caltech.edu/>.
- [22] 孙黎. 半导体激光器稳频方法的对比研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [23] Jentsch C, T. Müller, Rasel E M, et al. HYPER: A Satellite Mission in Fundamental Physics Based on High Precision Atom Interferometry[J]. General Relativity and Gravitation, 2004, 36(10): 2197 - 2221.
- [24] Adams C S, Riis E. Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms[J]. Progress in Quantum Electronics, 1997, 21(1): 1 - 79.
- [25] 李楠. 基于原子的磁场与重力场测量的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
- [26] Kovachy T, Chiow S W, Kasevich M A. Adiabatic-rapid-passage Multiphoton Bragg Atom Optics[J]. Physical Review A, 2012, 86(1).
- [27] Snadden M J, McGuirk J M, Bouyer P, et al. Measurement

- of the Earth's Gravity Gradient with an Atom Interferometer-Based Gravity Gradiometer [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(5): 971–974.
- [28] 许翊鹏. 原子干涉型重力仪的共模噪声抑制研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2016.
- [29] 李一民. 冷原子干涉仪实验程序控制系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [30] Hauth M, Freier C, Schkolnik V, et al. First Gravity Measurements Using the Mobile Atom Interferometer GAIN[J]. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 2013, 113(1): 49–55.
- [31] Louchet-Chauvet A, Farah T, Bodart Q, et al. The Influence of Transverse Motion Within an Atomic Gravimeter[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(6): 065025.
- [32] Carraz O, Lienhart F, Charrière R, et al. Compact and Robust Laser System for Onboard Atom Interferometry[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 405–411.
- [33] Dimopoulos S, Graham P W, Hogan J M, et al. Gravitational Wave Detection With Atom Interferometry[J]. *Physics Letters B*, 2009, 678(1): 37–40.
- [34] 邹鹏飞. 冷原子干涉仪的理论建模与误差分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [35] 孙亨利. 原子干涉仪高精度稳频锁相系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [36] 黄壮. 原子干涉仪集成化光学系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [37] Farah T, Guerlin C, Landragin A, et al. Underground Operation at Best Sensitivity of the Mobile Lne-syrte Cold Atom Gravimeter[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, 5(4): 266–274.
- [38] Merlet S, Bodart Q, Malossi N, et al. Comparison Between Two Mobile Absolute Gravimeters: Optical Versus Atomic Interferometers[J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): L9–L11.
- [39] Hamilton P, Jaffe M, Brown J M, et al. Atom Interferometry in an Optical Cavity. [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(10): 1–2.
- [40] Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L, et al. Precision Measurement of the Newtonian Gravitational Constant Using Cold Atoms[J]. *Nature*, 2014, 510(7506): 518–521.
- [41] 程冰. 基于冷原子干涉的重力加速度精密测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [42] Hamilton P, Zhmoginov A, Robicheaux F, et al. Antimatter Interferometry for Gravity Measurements[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(12): 121102.
- [43] 仲丽丽. 冷原子束干涉研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [44] 涂文凯. 冷原子用的稳频激光及系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [45] Tarallo M G, Alberti A, Poli N, et al. Delocalization-enhanced Bloch Oscillations and Driven Resonant Tunneling in Optical Lattices for Precision Force Measurements[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(3): 033615.
-
- 收稿日期:** 2019–05–08
- 基金项目:** 国家自然科学基金项目(61727819); 十三五计量基础项目(JSJL2016205C005); 航空基金项目(20165644002)
- 作者简介**
- 贡昊(1994–), 男, 内蒙古赤峰人, 主要研究方向为大回路原子干涉操控方法。2016年毕业于北京理工大学工程力学专业, 获得学士学位, 2017年至今在北京长城计量测试技术研究所攻读仪器科学与技术专业硕士学位。
- 
- 王宇(1978–), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事量子计量技术相关研究, 包括力学量动态校准、原子的激光冷却及原子干涉原理重力测量等。
- 
- 主持量子精密测量项目10余项, 成功研制冷原子干涉重力仪。发布国家标准1部, 文章20余篇, 授权专利4项。任中国振动工程学会振噪控制专业委员会副秘书长, 常务理事。