

多频率合成主动抑制激光稳频的剩余幅度调制

范夏雷^{1,2} 金尚忠¹ 张 枢^{1,2} 李 烨^{2,3} 林弋戈^{2*} 方占军²

¹中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

²中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100013

³清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要 宽带波导型电光调制器(EOM)可以施加多个频率射频信号,通过3个频率的合成,在激光载波上调制出3对边带。利用这3对边带某一侧的3个频率信号进行 Pound-Drever-Hall(PDH)频率锁定实验,通过调整其中某一个频率信号的相位,可以实现对频率锁定误差信号基线的调整。频率锁定系统中的剩余幅度调制(RAM)噪声同样造成误差信号基线的漂移,通过主动反馈控制系统调制频率信号的相位,实现了对剩余幅度调制噪声的抑制。实验表明,在主动反馈系统闭环后,对剩余幅度调制噪声的抑制程度达到30 dB以上,并有效地抑制了噪声漂移。

关键词 激光器; 激光频率稳定; 频率调制光谱; 剩余幅度调制; 电光调制器; 伺服控制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0402001

Active Suppression of Residual Amplitude Modulation in Laser Frequency Stabilization by Multi-Frequency Mixing

Fan Xialei^{1,2} Jin Shangzhong¹ Zhang Shu^{1,2} Li Ye^{2,3} Lin Yige² Fang Zhanjun²

¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing, 100013, China

³Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract A wideband waveguide electro-optical modulator (EOM) is driven by multiple frequencies signal. By synthesizing three frequencies and using these frequencies to drive the wideband waveguide EOM, three pairs of sidebands are added to the carrier laser frequency. Three sidebands on one single side of the carrier are used to laser frequency stabilization by Pound-Drever-Hall (PDH) technique. By adjusting the phase of one frequency signal, the baseline drift of the PDH error signal is controlled. The residual amplitude modulation (RAM) noise in frequency locking system also causes error signal baseline drift, through active phase modulation frequency signal feedback control system, the residual amplitude modulation noise suppression is realized. Experimental results show that after applying the active closed loop feedback system, the RAM noise is suppressed over 30dB, and noise drift is suppressed effectively.

Key words lasers; laser frequency stabilization; frequency modulation spectroscopy; residual amplitude modulation; electro-optical modulator; servo control

OCIS codes 140.3425; 140.3518; 060.5060

1 引 言

稳频激光在高分辨率光谱学、激光测距、引力波探测等领域具有重要应用^[1-5]。在光频标领域,如铯原子光

收稿日期: 2015-09-14; 收到修改稿日期: 2015-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(91336212、91436104)

作者简介: 范夏雷(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: shanksvan@163.com

导师简介: 金尚忠(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤测温、LED照明和红外检测技术研究等方面的研究。

E-mail: jinsz@cjl.edu.cn

*通信联系人。E-mail: linyige@nim.ac.cn

钟研究中,需将钟跃迁探测激光的频率锁定在铯原子的 $^1S_0 - ^3P_0$ 跃迁上^[6],这个跃迁的自然线宽只有 1 mHz^[7],对探测激光的线宽及稳定度的要求很高,实验中要尽可能地提高激光的频率稳定度,降低激光的线宽。

Pound-Drever-Hall(PDH)激光稳频技术是实现窄线宽最有效的稳频技术之一^[8]。它结合了频率调制光谱技术和光外差探测技术,伺服响应快、噪声低。PDH 稳频技术中非常重要的环节是利用电光调制器(EOM)的电光效应,在电光晶体上加一个射频信号,对激光进行相位调制,使经过电光晶体后的激光载波信号两边出现幅度相等、相位相反的调制边带,载波与边带经过参考法布里-珀罗(F-P)腔反射后的信号被光电探测器接收,与本地射频信号混频,就可得到鉴频信号,通过伺服控制系统对激光频率进行反馈控制。但是,在实际应用中,EOM对激光进行相位调制的同时,往往伴随着一定的幅度调制,被称为剩余幅度调制(RAM)^[9]。RAM的存在影响了相位调制的效果,表现为载波信号两边的边带信号幅度大小不严格相等,或相位不严格相反^[9],甚至两者都有。在PDH稳频法中,鉴频信号会发生基线漂移,使得稳频后的激光频率不严格等于腔的共振频率。更糟糕的是,RAM引起的直流偏移会随时间而随机变化,而PDH稳频系统无法将这个偏移变化与由于激光频率抖动造成的鉴频信号变化区分,从而错误地改变频率^[10],导致激光频率稳定度的下降。RAM的存在限制了激光频率稳定度的进一步提升。

有很多文献对RAM和RAM噪声(随时间变化)的产生机理进行了研究^[9,11-13],多个因素可导致RAM噪声的产生:EOM晶体的双折射效应容易随温度变化;EOM晶体对光的散射;F-P效应(不仅是EOM晶体本身光学平面之间反射造成的F-P效应,还包含系统中其他光学元件的反射与EOM光学平面之间形成的F-P效应);光学平台的振动;射频电场的均匀性和射频信号功率的起伏;激光频率的抖动等。

从20世纪80年代开始,国内外就有研究小组着手研究抑制RAM的方法,并取得了一定的成果^[2,9,14-17]。国外方面,Whittaker等^[15]分析了由电光晶体的F-P标准具效应引起的RAM,并提出了双调制技术,将RAM减小了4倍。JILA实验室的Wong等^[9]用主动反馈控制的方法,调节电光晶体两端的直流电压,可以实时消除RAM,使PDH技术的探测极限达到散粒噪声的极限。国内方面,邓勇开等^[18]通过对EOM晶体的温度进行伺服控制,对RAM的抑制效果达到了40 dB以上。陈玉华等^[19]采用对称非共焦F-P腔,利用伺服控制系统将F-P腔锁定在透射光外差光谱中心过零点处,即正负一级调制边带幅度相等,抑制RAM的效果达到45 dB。但是,对于主动反馈电光晶体两端直流电压的方法会引入附加的低频噪声,在几十秒至几百秒的取样时间内导致激光频率稳定度变差^[18]。对电光晶体的温度进行伺服控制,虽然控制范围大,但是对RAM的变化响应较慢,控制具有滞后性,不能实时控制RAM噪声^[18]。利用F-P腔抑制RAM噪声的方法对F-P腔的要求较高,而且腔易受温度、振动等因素影响^[8]。

本文对电光调制晶体RAM的抑制进行了实验研究,并提出在电光调制晶体上加三路射频信号,对其中一路信号进行主动相位反馈以抑制PDH调制信号RAM的新方法。

2 理论说明

电光调制器(EOM)是可以用来对激光进行相位调制的器件。调节入射激光的偏振方向与电光调制器的主轴平行,是对激光进行纯相位调制的必要条件,故在实验中需采用偏振调节元件调整激光偏振方向与晶体光轴之间的差异。考虑激光沿着晶体的X轴方向传播,调制信号沿着Z轴方向加在晶体上。

根据参考文献[9],加载调制信号的激光经过EOM晶体后的合成电场可以表示为

$$E_T = E_0 \exp(i\omega_0 t) \{ \sin\beta \sin\gamma \exp[i(\varphi_o + \delta_o \sin\omega_m t)] + \cos\beta \cos\gamma \exp[i(\varphi_e + \delta_e \sin\omega_m t)] \}, \quad (1)$$

式中 $E_0 \exp(i\omega_0 t)$ 是入射激光的电场,沿Z轴方向, β 、 γ 分别是电光调制晶体前后的起偏器与检偏器允许通过的偏振方向与Z轴的夹角, φ_o 、 φ_e 分别为寻常光与非常光由于晶体的自然双折射产生的相移, $\delta_o \sin\omega_m t$ 、 $\delta_e \sin\omega_m t$ 为寻常光与非常光加载交流调制电压后产生的相移, ω_m 为射频调制信号的频率。

RAM信号即光电探测器产生的调制频率 ω_m 处的光电流的奇次谐波,表示为

$$I(k\omega_m) = -\sin 2\beta \sin 2\gamma |E_0|^2 J_k(M) \sin(k\omega_m t) \sin \Delta\varphi, \quad (2)$$

式中 $k > 0$, 为奇数, J_k 为 k 阶贝塞尔函数, M 为射频交流信号引起的寻常光与非常光的相位差,即幅度调制深度, $\Delta\varphi$ 表示电光晶体自然双折射引起的寻常光与非常光的相位差。RAM信号幅度不为零,表示电光调制

器没有做到纯相位调制,在PDH稳频中体现为鉴频信号的锁定点不在谱线中心。其中 $\Delta\varphi$ 可能会因为晶体温度、应力等发生变化而改变,造成RAM幅度的变化,进而导致PDH鉴频信号基线(锁定点)的漂移,使得频率锁定系统把幅度噪声当作频率噪声而同样反馈到激光频率中,造成频率锁定稳定度下降。理论上将 $\Delta\varphi$ 控制在0或者 π 的整数倍就可以消除RAM在PDH稳频中的影响。在以前的研究工作中,通过伺服控制EOM晶体的温度^[18]或主动反馈EOM晶体两端的直流电压^[9],即将 $\Delta\varphi$ 控制在0或者 π 的整数倍,从而达到抑制RAM的目的。

通常PDH稳频方法中,采用一路调制频率,产生的调制边带如图1所示。

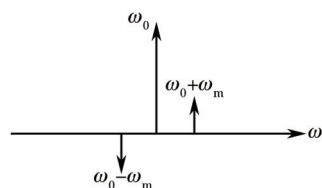


图1 一路调制信号的PDH调制边带

Fig.1 PDH modulation sidebands with single modulation signal

图1中 ω_0 为激光载波频率, ω_m 为射频调制频率,由贝塞尔函数的频域分布特性可知,理想情况下两边带的幅度相等,相位相反。RAM的存在体现为两个边带的幅度不相等或者相位不严格相反。由于调节 ω_m 会同时对两个边带造成影响,只有一个自由度,无法实现对单个边带的幅度或相位进行调整。宽带EOM能够同时加载多路调制信号,为在射频频段调整多个信号的相对相位关系提供了可能。采用多路调制信号加载到宽带EOM上合成的方法,模拟传统PDH方法中的三个信号的幅度和相位关系,增加调节的自由度,实现对这三个信号中的某一个信号进行独立的幅度或者相位调整。频率合成的过程如图2所示。

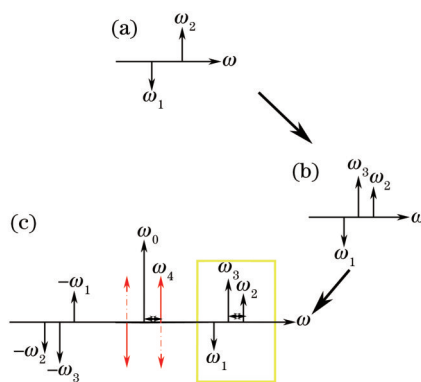


图2 合成PDH调制信号

Fig.2 Synthesis of PDH modulation signal

图2中 $\omega_1=75\text{ MHz}$ 与 $\omega_2=85\text{ MHz}$,由两路直接数字式频率合成(DDS)信号(80 MHz与5 MHz)通过双平衡混频器(DBM)混频得到,在利用多频率合成进行PDH稳频中,需要 ω_1 与 ω_2 反相,由混频原理可知,通过调整产生80 MHz信号与5 MHz信号的DDS信号发生器的初始相位差,可以实现 ω_1 、 ω_2 的相位相反,如图2(a)所示,图中给出的信号包含相位信息。其中的80 MHz信号被双平衡混频器抑制了45 dB以上,在示意图中忽略。 ω_3 为第三路DDS信号(80 MHz),与此前混频后的信号相加得到如图2(b)所示的信号。三路信号加载在EOM上得到调制边带如图2(c)所示,其中矩形框内的信号为加载在EOM上的三路信号(ω_1 、 ω_2 、 ω_3)在载波频率 ω_0 一侧的频谱,这部分频谱与图1中的传统PDH频谱在幅度和相位关系上是一致的,可以用来作PDH稳频。用来合成 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 的三个DDS信号发生器使用了同一个外部频率参考源^[20]且DDS产生的射频信号相位噪声非常低,因此信号之间的相位关系固定且噪声抑制比满足PDH锁定的需求。相比于一路信号直接加在EOM上, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 三路信号合成的信号可以从多个方面(幅度、频率和相位)对其相对关系进行调节,从而在PDH稳频中提供了更多抑制RAM噪声的反馈途径。正如前文所述,RAM噪声会导致PDH鉴频曲线的基线漂移,当所述的合成信号加在EOM晶体上后, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 三路信号都会产生相对应频率的

RAM,但是这三个频率的RAM并不直接影响PDH稳频, ω_4 (5 MHz)是由于 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 三者相对幅度不对称引起的RAM信号,其频率与下一步PDH稳频方法中需要解调频率 ω_m 相同,如图2(c)所示。 ω_4 的相位取决于 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 之间的相位关系,可能为正,也可能为负。 ω_4 满足以下特征:1) 加在EOM上的射频信号中没有其对应的频率,在光电探测器的输出信号中有其对应的频率;2) 该信号的频率与PDH的解调频率相等;3) 调节入射激光的偏振方向与EOM主轴的夹角,可以观察到光电探测器的输出信号发生了与理论一致的变化;4) 在没有EOM的情况下,光电探测器的输出信号中没有该信号。综上所述, ω_4 是需要抑制RAM噪声的频率。采取对 ω_3 信号相位进行反馈控制的方法调节 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 之间的相对相位关系来抑制 ω_4 ,实现对PDH误差信号基线的调整,补偿RAM引起的基线漂移,达到抑制PDH稳频中RAM噪声的目的。

3 主动式RAM噪声伺服控制系统

为了对PDH稳频中的RAM噪声进行抑制,设计并搭建了一套主动式RAM噪声伺服控制系统。图3为RAM噪声反馈控制系统的原理框图。实验中采用了1.5 μm 的集成外腔半导体激光器(RIO Planex External Cavity Laser),激光器产生单模激光,经保偏光纤(PMF)输出以保证激光的偏振态。另外,为保证激光的偏振方向与EOM晶体的电场方向相匹配,在半导体激光器与EOM晶体中加了一个光纤偏振调节器,用来调整激光进入EOM的偏振方向。实验中用的EOM为宽带波导型EOM(Thorlabs, LN65S-FC),带有输出偏振器。波导型EOM具有以下优势:1) 跟空间型EOM晶体相比,得到相同的激光相移所需调制电压小很多;2) EOM晶体输入端的光纤就是一个有效的光模式选择器,能够限制输入激光的尺寸,从而抑制由于光场的不均匀性带来的RAM噪声;3) 波导型EOM的输出端输出高质量的准基横模激光,同样避免了空间不均匀性带来的RAM;4) 波导型EOM晶体能稳定晶体中光路的位置,从而减少了光路位置偏移带来的RAM相位抖动。加在EOM晶体上的射频信号由 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 组成,80 MHz信号和5 MHz信号经过双平衡混频器混频后得到 ω_1 和 ω_2 信号,第三路信号发生器产生 ω_3 信号, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 信号经过滤波(41~98 MHz带通滤波器)、放大后加在EOM晶体上。经过EOM后,被射频信号调制过的激光分为两部分,一部分进入光电探测器(PD)用来探测RAM,另一路输出供PDH稳频使用。PD将光信号转化为电信号经过放大、滤波后进入混频器的RF端,与PDH稳频中的本振信号 ω_5 (5 MHz)信号混频,调节这个信号的相位,使得混频后IF端的信号能够有效反映RAM的大小,混频后的信号作为误差信号输入伺服控制器(LB1005 Servo Controller),通过PI调节、伺服控制后,主动反馈控制 ω_3 信号的相位,补偿由RAM产生的PDH鉴频曲线基线的偏移,实现对PDH稳频中RAM噪声的抑制。频谱仪(Rigol,n9340b)用来监测RAM信号及其抑制效果。

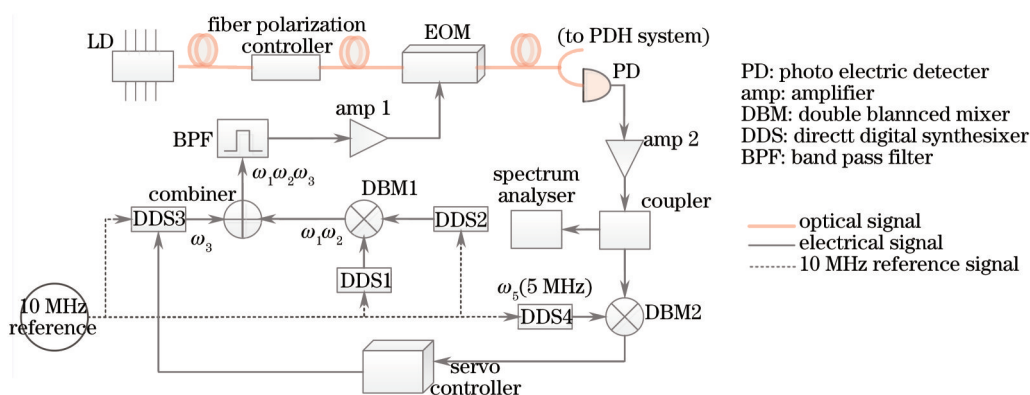


图3 剩余幅度调制噪声主动抑制系统框图

Fig.3 Diagram of residual amplitude modulation noise active suppression system

实验中加在EOM晶体上的射频信号由 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 组成,三路射频信号的RAM合成产生稳频中需要抑制的RAM信号 ω_4 ,可以独立改变 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 各路信号参数来改变三路信号之间的相对相位或相对幅度关系,进而抑制RAM信号 ω_4 ,调节PDH稳频信号的基线,可调节的参数不限于某一个参数,比较灵活。实验中,考虑到控制 ω_3 的相位能更容易调整其与 ω_1 和 ω_2 之间的相对相位关系(位于两频率之间,增益加倍),

因此实验中对 ω_3 信号进行了相位反馈。

4 实验结果

实验中使用频谱分析仪来监测 EOM 产生的 RAM 噪声,得到的频谱如图 4 所示。由于实验中的 RAM 信号频率为 5 MHz,设置频谱仪的带宽为 2 MHz,分辨率带宽(RBW)和视频带宽(VBW)为 1 kHz。当对 EOM 晶体的 RAM 噪声控制开环时,频谱中 5 MHz 信号功率在 -30 dBm 左右,且随时间呈无规则抖动,抖动范围为 15 dB 左右,这是由于各种原因导致 EOM 调制系统没有实现完美的相位调制。当反馈控制闭环锁定后,EOM 晶体的 RAM 噪声被抑制到频谱仪的噪声本底中,而且未观测到功率抖动。实验通过对 ω_3 的相位进行反馈控制,对 RAM 的抑制程度超过 30 dB。

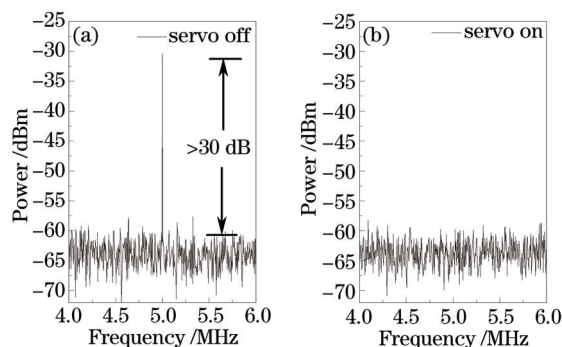


图 4 伺服控制(a)开环和(b)闭环的 RAM 频谱

Fig.4 Spectra of RAM with servo control (a) off and (b) on

5 结 论

实验中观察了电光调制器的 RAM,通过多频率合成的方式得到调制信号,在探测到稳频系统需要抑制的 RAM 噪声后,通过一套伺服控制系统对加在电光调制晶体上的其中一路射频信号进行主动相位反馈,实现了对 RAM 噪声的抑制,抑制程度达到了 30 dB 以上,且有效地抑制了 RAM 噪声的抖动。实验方案具有结构简单,对电光晶体的 RAM 噪声的变化反应速度快等特点。由于是初步实验,在接下来的工作中需要对实验参数进一步优化,控制实验环境,进一步提高对 RAM 噪声的抑制水平,并把此方案应用到实际的 PDH 稳频系统中。

参 考 文 献

- 1 R J Rafac, B C Young, J A Beall, *et al.*. Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of $^{199}\text{Hg}^+$ [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2462-2465.
- 2 H Müller, S Herrmann, T Schuldt, *et al.*. Offset compensation by use of amplitude-modulated sidebands in optical frequency standards [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(22): 2186-2188.
- 3 B Willke. Stabilized lasers for advanced gravitational wave detectors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 780-794.
- 4 Han Yashuai, Wen Xin, Bai Jiandong, *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.
- 5 Lin Baike, Cao Shiyang, Zhao Yang, *et al.*. A compact iodine-stabilized solid-state laser at 532 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902002.
林百科, 曹士英, 赵阳, 等. 小型化碘稳频 532 nm 固体激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902002.
- 6 B J Bloom, T L Nicholson, J R Williams, *et al.*. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- 7 M Takamoto, F L Hong, R Higashi, *et al.*. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.

- 8 E D Black. An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79–87.
- 9 N C Wong, J L Hall. Servo control of amplitude modulation in frequency–modulation spectroscopy: Demonstration of shot–noise–limited detection[J]. J Opt Soc Am B, 1985, 2(9): 1527–1533.
- 10 Jiang Yanyi. Narrow linewidth lasers: Application to optical clocks[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- 11 G C Bjorklund, M D Levenson, W Lenth, *et al.*. Frequency modulation (FM) spectroscopy[J]. Applied Physics B, 1983, 32(3): 145–152.
- 12 M Romagnoli, M D Levenson, G C Bjorklund. Frequency–modulation–polarization spectroscopy[J]. Opt Lett, 1983, 8(12): 635–637.
- 13 M D Levenson, W E Moerner, D E Horne. FM spectroscopy detection of stimulated Raman gain[J]. Opt Lett, 1983, 8(2): 108–110.
- 14 L Li, F Liu, C Wang, *et al.*. Measurement and control of residual amplitude modulation in optical phase modulation[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(4): 043111.
- 15 E A Whittaker, H Grebel, H Lotem, *et al.*. Reduction of residual amplitude modulation in frequency–modulation spectroscopy by using harmonic frequency modulation[J]. J Opt Soc Am B, 1988, 5(6): 1253–1256.
- 16 S Kasapi, S Lathi, Y Yamamoto. Sub–shot–noise frequency–modulation spectroscopy by use of amplitude–squeezed light from semiconductor lasers[J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(2): 275–279.
- 17 F Du Burck, O Lopez, A E Basri. Narrow–band correction of the residual amplitude modulation in frequency–modulation spectroscopy [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2003, 52(2): 288–291.
- 18 Deng Yongkai, Li Ye, Cao Jianping. Suppression of fluctuation of residual amplitude modulation in electro–optical phase modulators[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1063–1068.
邓勇开, 李 焱, 曹建平. 电光相位调制器中剩余幅度调制变化的抑制[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1063–1068.
- 19 Chen Yuhua, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi. Suppression of residual amplitude modulation in electro–optical phase modulators using Fabry–Perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1877–1882.
陈玉华, 蒋燕义, 毕志毅. 利用法布里–珀罗腔抑制电光相位调制中的剩余幅度调制[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1877–1882.
- 20 L Ye, L Yige, W Qiang, *et al.*. A hertz–linewidth ultrastable diode laser system for clock transition detection of strontium atoms[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(2): 24207–24210.

栏目编辑: 宋梅梅