

文章编号: 0253-2239(2006)07-1063-6

## 电光相位调制器中剩余幅度调制变化的抑制<sup>\*</sup>

邓勇开<sup>1</sup> 李 焯<sup>2</sup> 曹建平<sup>2</sup> 高春清<sup>1</sup> 臧二军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)  
(<sup>2</sup> 中国计量科学研究院量子部, 北京 100013)

**摘要:** 实验研究了电光相位调制中剩余幅度调制以及它的变化引起的碘稳频 532 nm 光频标的频率漂移。观测了电光晶体温度与剩余幅度调制和光频标锁定后激光频率之间的变化关系。研究了利用主动电压反馈抑制剩余幅度调制的实际效果和存在问题。提出并实现了采用主动温度反馈控制电光晶体温度对剩余幅度调制变化的抑制。实验表明,在主动温度反馈系统闭环后,剩余幅度调制基波成分的抑制程度超过 40 dB,同时有效地控制了剩余幅度调制的变化。采用该系统后,没有发现产生附加的激光频率起伏。测量的百秒至万秒取样时间的激光频率稳定度可达到或优于  $5 \times 10^{-15}$ ,明显地改善了碘稳频 532 nm 光频标的中长期激光频率稳定度。

**关键词:** 激光技术; 激光频率稳定; 剩余幅度调制; 伺服控制; 电光相位调制

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Suppression of Fluctuation of Residual Amplitude Modulation in Electro-Optical Phase Modulators

Deng Yongkai<sup>1</sup> Li Ye<sup>2</sup> Cao Jianping<sup>2</sup> Gao Chunqing<sup>1</sup> Zang Erjun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Opto-Electro Engineering, College of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)  
(<sup>2</sup> Optical Frequency Laboratory, Quantum Department, National Institute of Metrology, Beijing 100013)

**Abstract:** Residual amplitude modulation (RAM) in electro-optical phase modulators (EOM) and its influence on the laser frequency shift of iodine-stabilized 532 nm laser are investigated experimentally. The relationships between the EOM crystal temperature and the RAM, as well as stabilized laser frequency are observed. The effects and problems of using active voltage feedback method to suppress the RAM are researched. An active temperature feedback method is proposed and demonstrated to suppress the RAM fluctuation by controlling the EOM temperature. With this method the suppression of the fundamental component in the RAM spectra overtakes 40 dB. The RAM fluctuation is controlled effectively, and additional frequency fluctuation is induced from adopting the system. The laser frequency stability can achieve or be better than  $5 \times 10^{-15}$  for the averaging time from 100 s to  $10^4$  s, and the stability of iodine-stabilized 532 nm laser frequency in a medium and long term is improved greatly.

**Key words:** laser technique; laser frequency stability; residual amplitude modulation; servo control; electro-optical phase modulation

### 1 引 言

高稳定度稳频激光器已广泛用在激光干涉测量、高分辨力光谱和光通信等方面。特别是在计量学上,作为光频标准的稳频激光器对激光频率的稳定性和复现性要求极高。在实现激光频率稳定的方法中,频率调制(FM)方法和调制转移光谱(MTS)方法已被广泛用于超精细光谱和激光频率稳定的研

究<sup>[1~4]</sup>。在调频和调制转移光谱法中,为了获得鉴频信号,需要将抽运光经过电光调制器(EOM)进行相位调制。实验中发现,经过电光相位调制后,在产生相位调制的同时,还出现了剩余幅度调制(RAM)<sup>[5]</sup>。剩余幅度调制的存在,限制了频率稳定度的进一步提高。

尽管与调频方法相比,采用调制转移光谱方法可

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60178009, 60478032)和科技部专项基金(2001DEA30028)资助课题。

作者简介:邓勇开(1981~),男,广东韶关人,北京理工大学硕士研究生,主要从事光电子、激光技术方面的研究。

E-mail: kimpeady@163.com

收稿日期: 2005-08-17; 收到修改稿日期: 2005-10-27

以在一定程度上弱化这种剩余幅度调制对锁定后激光频率稳定度的影响。通过对电光相位调制器进行被动精密温度控制,也可改善剩余幅度调制对稳定度的影响。这些措施的采用,使得锁定后的激光频率稳定度可达到  $10^{-14}$  的量级。但是基于 532 nm 固体频标的极好的频率稳定度潜力(例如达到  $10^{-15}$  量级),并且由于对建立在可见光范围内,能实现的更高激光频率稳定度( $\leq 5 \times 10^{-15}$ )的分子光频标的追求,这种弱化后的影响仍然不可忽略。文献[6,7]从不同的角度对剩余幅度调制产生的原因进行了理论分析,并在实验上通过采用主动反馈偏置电压控制的方法对剩余幅度调制进行抑制。文献[8]介绍了在电光调制器上加基频和二次谐波的方法。上述两种方法均采用电压反馈进行剩余幅度的抑制,然而在实验中发现,电压反馈方法在对剩余幅度调制抑制的实施过程中,可能会引入一些额外的低频噪声和频率起伏,在某些更低的频段上,例如几十秒至几百秒的取样时间,使得频率稳定度变差。本文对电光相位调制器中的剩余幅度调制抑制进行了实验研究。

## 2 剩余幅度调制的观测

实验采用调制转移光谱技术实现 532 nm 激光系统的频率稳定,实验系统如图 1 所示。调制转移光谱

532 nm 稳频激光系统详见文献[9,10]。偏振分束棱镜将光束分为抽运光和探测光,抽运光经过声光调制器(AOM)移频 80 MHz 后,经电光调制器(EOM)调制相位,然后进入碘室。探测光沿着与抽运光共线反向的路径通过碘室,由偏振分束棱镜(PBS)导出到光电探测器(PD)上。再经过双平衡混频器(DBM),比例积分(PD)调理电路和伺服电路,产生调制转移误差信号,分别控制单块激光器中单块晶体上的压电陶瓷电压和单块晶体温度。实验用了两套类似的装置 GY1 和 NY1。装置 GY1 采用德国 Innolight 公司的商品 P20E 单块激光器作为光源,另一套装置 NY1 采用自行研制的半非平面单块激光器<sup>[10,12]</sup>。两套装置都将激光频率锁定在碘分子吸收谱线 R(56)32-0 超精细结构中的  $a_{10}$  分量(频率为 563260223.48 MHz)上,输出光束合束后入射到由雪崩光电二极管(APD)构成的宽带光电探测器上,光电探测器的输出送入频率计进行拍频测量,频率计的测量数据通过计算机实现计算处理和记录。电光相位调制器是 NewFocus 公司的谐振式电光调制器(Model 4001-M),晶体材料为  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 。两套装置的电光相位调制器采用的相位调制信号由晶振(Crystal Oscillator)产生,调制频率分别为 224 kHz(EOM1)和 277 kHz(EOM2)。

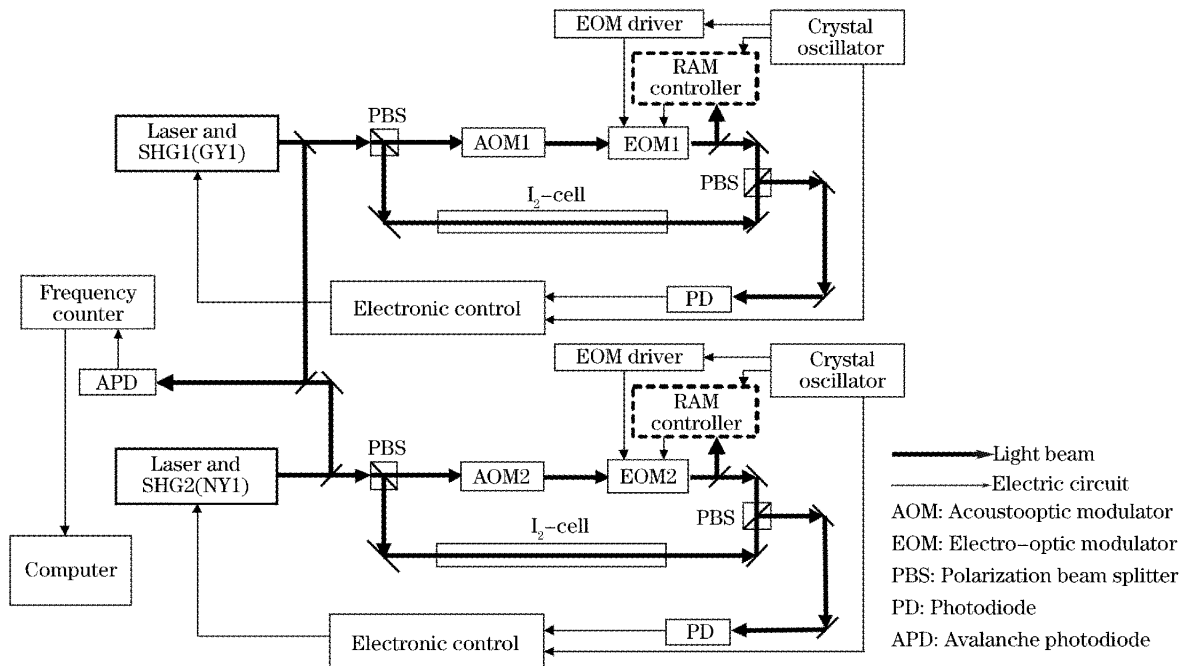


图 1 激光稳频系统示意图

Fig. 1 Configuration of laser stabilizing system

激光频率因电光晶体温度改变而变化。实验主要考察了装置 NY1 中剩余幅度调制造成的锁定后的激光频率随 EOM2 温度变化的情况。图 2 给出了将 EOM2 温度从 25.75 °C 增加到 26.54 °C, 保持其它实验条件不变, 拍频测量的温度扫描激光频率变化曲线。可以看出, 电光晶体温度引起激光频率发生周期性变化, 一个周期约对应 0.26 °C。为了反映一个周期内激光频率随 EOM2 温度更细致的变化趋势, 在图 3 中给出了 EOM2 温度与激光频率的关系。在最大斜率 26.38 °C 附近, 激光频率对温度的变化率约为  $-1.2 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$ 。

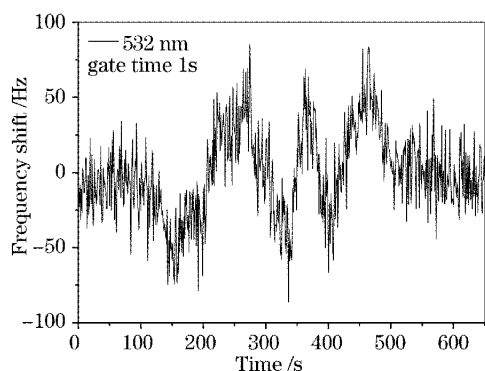


图 2 EOM2 温度扫描时的激光频率变化  
(25.75~26.54 °C)

Fig. 2 Frequency fluctuation while scanning EOM2 temperature (25.75~26.54 °C)

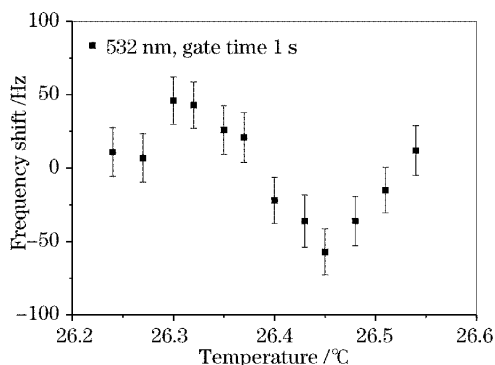


图 3 EOM2 温度与激光频率的关系(一个周期)

Fig. 3 Relationship between EOM2 temperature and frequency (in one period)

剩余幅度调制的出现使得在电光相位调制器之后, 可以由光电探测器直接探测到激光功率波动的相应频谱成分。用频谱分析仪观察可以看出, 电光相位调制器中剩余幅度调制的基波和高次谐波也随 EOM2 温度发生周期性起伏的变化, 其变化周期约为激光频率变化周期的 2 倍。且基波与二次谐波的消长交错出现, 基波分量为零时, 二次谐波分量最

大, 而基波分量最大时, 二次谐波分量为零。实验中发现, 谐波分量的零点与温度的对应关系也会发生变化, 谐波为零的点对应的温度不是固定不变的, 而是随时间改变。这一点对采用主动温度反馈是十分重要的。因此, 仅仅采用精密控温是不够的, 而需要由主动的方式才能跟踪到谐波零点, 控制剩余幅度调制, 提高激光频率稳定度。

实验中还发现, 将经过电光调制器的光束扩大后, 当探测器的接收面仅接收整个光斑中的某一部局光斑面积时, 剩余幅度调制的频谱分量大小是不同的, 并且可能与总的光斑被接收时的频谱分量不同。在一些位置, 可以得到很强的基频分量, 而在另一些位置, 基频分量可能为零。这表明光束的剩余幅度调制在空间的分布并不一定是均匀对称的。

### 3 主动式剩余幅度调制控制伺服系统

为了达到对剩余幅度调制变化更好地抑制的效果, 实验中采用了主动温度反馈方式控制电光调制器的剩余幅度调制, 图 4 为反馈控制系统的原理框图。激光器倍频后输出的 532 nm 激光经过电光相位调制器进行相位调制。晶振的一路信号  $f_m$  作为电光调制器驱动信号, 另一路经过相移、滤波进入双平衡混频器 (DBM) 本振端 LO。电光调制器出射光束的一小部分由反射镜反射到光电探测器。光电探测的信号经过滤波放大后, 进入 DBM 射频端 RF。由双平衡混频器与本振信号进行混频, 获得中频信号。再经过比例积分电路 (PI Control) 和伺服电路 (Servo Control) 将信号传递到电光相位调制器的温度控制器。控制电光调制器电光晶体的温度, 实现对电光相位调制器中剩余幅度调制变化的控制。

从剩余幅度调制产生的原因来看, 剩余幅度调制可以通过控制电光晶体上的直流电压进行控制, 并且这种方法可以获得更宽的反馈系统带宽。基于这种考虑, 在实验开始阶段, 采用了快慢通道反馈控制的思想对电光晶体分别进行反馈控制。其中快通道控制施加在电光晶体上的直流偏压, 从而控制晶体内的缓变电场。该通道对剩余幅度调制的变化响应快, 但是调整控制范围小。而慢通道控制电光晶体的温度, 它的响应较快通道慢, 但是控制范围大。然而通过实验发现, 通过快通道抑制剩余幅度调制时可引入附加的低频噪声和频率起伏, 例如在几十秒至几百秒的取样时间范围内, 激光频率锁定后的频率稳定度变差, 该取样时间对应的频率变化正好

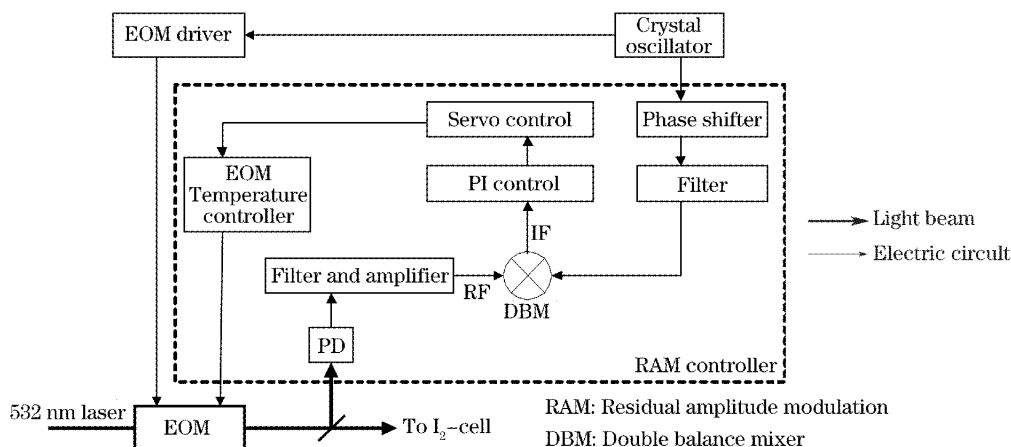


图 4 伺服控制剩余幅度调制的原理框图

Fig. 4 Scheme of servo control for residual amplitude modulation

相当于快通道调整过程的时间半周期。当改为仅通过慢通道实现反馈控制时,附加频率变化可以消除。因此在实验中采用了主动式反馈温度控制电光晶体的剩余幅度调制,通过选择合适的比例积分参量和耦合方式,可以获得较好的控制效果。由于剩余幅度调制与温度的周期性变化关系,存在着许多可选择的晶体温度工作点。为了减小控制功率,实验中将电光晶体温度设为室温附近。例如 EOM2 中的电光晶体工作温度设定为 26.25℃。在电光调制器外围进行了简单的隔热,控制后的电光晶体温度不会受到外界温度影响。由于剩余幅度调制的影响主要在低频范围,对反馈系统带宽的要求并不高。实验表明,通过合适的参量设定,可以获得

对剩余幅度调制变化有效的抑制。

#### 4 实验结果

实验中用频谱仪观察电光相位调制器的剩余幅度调制,得到的频谱如图 5 所示。起始频率为 0 Hz,截止频率为 1 MHz。对 EOM2 剩余幅度调制的控制开环时,频谱中同时存在基波,高次谐波成分,如图 5(a)所示。这些成分的相对大小与电光调制器的驱动功率或调制度有关。反馈控制闭环锁定后,剩余幅度调制的基波成分被控制在几乎为零的状态,基波成分的抑制程度超过 40 dB,但此时高次谐波并不为零,如图 5(b)所示。

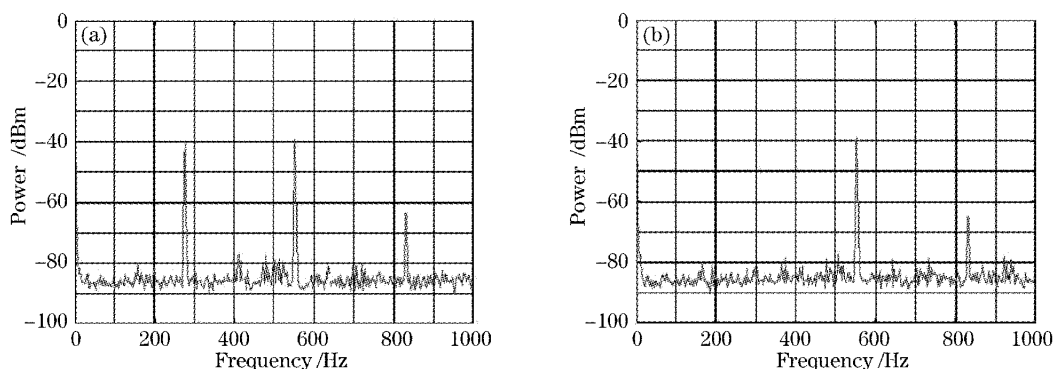


图 5 伺服控制开环时(a)和闭环时(b)的剩余幅度调制频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of residual amplitude modulation with servo control off (a) and on (b)

图 6 和图 7 给出了实验中采用拍频的方法测量的两台 532 nm 碘稳频激光装置在各自的激光频率锁定后的激光拍频曲线和频率稳定性。稳定性采用 Allan 方差表示<sup>[13]</sup>,并假设两台装置具有相等的频率稳定性。当剩余幅度调制控制系统开环时,电光调制器采用被动式精密温度控制,温度设定工作点

与闭环时一致,控温系统的温度稳定性小于 5 mK。比较图 6(a)和图 6(b)的拍频数据可以看到,尽管采用了精密的温度控制系统控制电光调制器晶体温度,但是还会存在一定的剩余幅度调制,这种剩余幅度调制变化的存在,使得锁定后的激光频率有缓慢的漂移,这与前面的实验观测现象是吻合的。

伺服系统闭环锁定后,拍频数据明显变得平直。从图 7(a)和图 7(b)可以看出,剩余幅度调制控制系统开环时,长期的激光频率稳定度变差,取样时间大于 1000 s 时激光频率稳定度回升到  $10^{-14}$  量级。这与国家计量局(BIPM)得到的实验数据是一致的<sup>[2]</sup>。

剩余幅度调制控制系统闭环后,激光频率稳定度有了明显的改善,在取样时间 100 s 之后,激光频率稳定度变平,至取样时间 10000 s 时,激光频率稳定度均在  $5 \times 10^{-15}$  的水平,甚至更好。

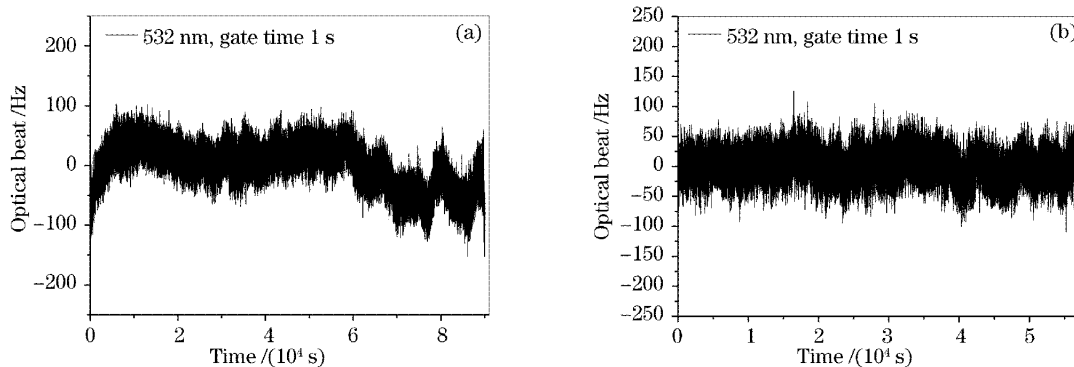


图 6 伺服控制开环(a)和闭环(b)时的拍频曲线

Fig. 6 Record of frequency measure with servo control off (a) and on (b)

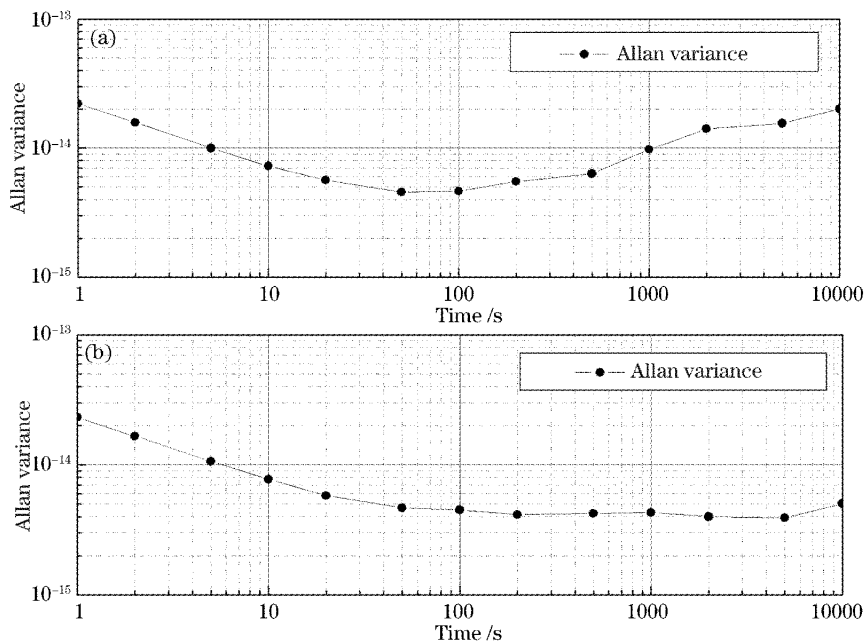


图 7 伺服控制开环(a)和闭环(b)时的阿伦方差曲线

Fig. 7 Allan variance curve with servo control off (a) and on (b)

## 5 结 论

实验研究并证实了电光调制器中存在剩余幅度调制,剩余幅度调制使得碘稳频的激光频率漂移。采用主动式反馈温度控制伺服系统可以有效地抑制剩余幅度调制,提高碘稳频的激光频率稳定度。在频率稳定度要求很高的情况下,要提高碘稳频 532 nm 激光以及其他稳频激光器的稳定度和复现性,就必须考虑稳频系统中存在的剩余幅度调制。

目前,还需要观测稳频系统中其他组件的剩余幅度调制情况,并找到抑制剩余幅度调制的解决方法。

## 参 考 文 献

- 1 J. L. Hall, L. S. Ma, M. Taubman *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the  $I_2$ -stabilized Nd:YAG laser[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2): 583~586
- 2 L. Robertsson, L. S. Ma, S. Picard. Improved iodine-stabilized Nd:YAG lasers[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4269**: 268~271
- 3 F. L. Hong, J. Ishikama, K. Sugiyama *et al.*. Comparison of independent optical frequency measurements using a portable

- iodine-stabilized Nd:YAG laser[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2003, **52**(2): 240~244
- 4 Bi Zhiyi, Luo Ming, Ding Jingxin *et al.*. Modulation transfer spectrum using Nd:YVO<sub>4</sub> minilaser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1699~1703 (in Chinese)  
毕志毅, 罗明, 丁晶新等. 微型Nd:YVO<sub>4</sub>激光器在碘分子调制转移光谱中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1699~1703
- 5 Luo Ming, Bi Zhiyi, Chen Yangqin *et al.*. Line-center shift of modulation transfer spectroscopy due to the asymmetry of sidebands[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(10): 1845~1851 (in Chinese)  
罗明, 毕志毅, 陈扬骏等. 边带非对称性对调制转移光谱中心频率的影响[J]. *物理学报*, 1999, **48**(10): 1845~1851
- 6 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
- 7 E. A. Whittaker, M. Gehrtz, G. C. Bjorklund. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **12**(8): 1320~1326
- 8 E. A. Whittaker, C. M. Shum, H. Grebel *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
- 9 J. Ye, L. Robertsson, S. Picard *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular I<sub>2</sub> lines at 532 nm[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1999, **48**(2): 544~549
- 10 M. L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, **44**(2): 155~158
- 11 E. J. Zang, J. P. Cao, M. C. Zhong *et al.*. Relaxed alignment tolerance of monolithic ring lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33): 7012~7017
- 12 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 335~340 (in Chinese)  
臧二军, 曹建平, 钟明琛等. 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
- 13 F. L. Hong, J. Ishikawa. Hyperfine structures of the R(122) 35-0 and P(84) 33-0 transitions of <sup>127</sup>I<sub>2</sub> near 532 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**(2): 101~108