

小型化碘稳频 1064 nm 半导体激光器研究

杜娟^{1,2}, 孙延光^{1*}, 陈迪俊¹, 黄敏捷¹, 杨中国¹, 刘继桥¹, 朱韧¹, 侯霞¹, 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 传统的 1064 nm 稳频激光器虽然能达到很高的频率稳定度和不确定度,但其体积比较庞大,系统设计比较复杂。而对于一些激光频率稳定度要求不高的实际应用,如高光谱分辨率气溶胶探测激光雷达,系统简单与缩小体积应该是更受关注的因素。利用碘分子吸收谱线并结合频率调制光谱技术建立了一套小型化的 1064 nm 稳频激光器,该系统结构紧凑。通过高稳定的波长计进行监测,测量频率稳定后的激光器在 10000 s 时的阿伦偏差精度小于 0.1 MHz。该稳频的 1064 nm 激光器系统已被用作高光谱分辨率气溶胶探测激光雷达单频脉冲光源的种子激光器。

关键词 激光光学; 激光稳频; 频率调制光谱技术; 激光雷达

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701006

Research of a Compact Iodine-Stabilized Diode Laser at 1064 nm

Du Juan^{1,2}, Sun Yanguang¹, Chen Dijun¹, Huang Minjie¹, Yang Zhongguo¹,
Liu Jiqiao¹, Zhu Ren¹, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

Abstract Although the traditional 1064 nm frequency-stabilized laser can achieve high frequency stability and uncertainty, its volume is relatively large and the system design is more complicated. For some practical applications where the laser frequency stability is not critical, such as hyperspectral resolution aerosol detection laser radar, the simplicity and volume reduction of the system become more of a concern. A miniaturized compact 1064 nm frequency-stabilized laser is built by using iodine molecule absorption lines combined with frequency modulation spectroscopy technology. The system has compact structure. By monitoring with a high stable wavemeter, the accuracy of Allan deviations is less than 0.1 MHz at 10000 s. The frequency-stabilized 1064 nm laser system has been used as a seeder laser for a single-frequency pulsed light source of the hyperspectral aerosol detection laser radar.

Key words laser optics; laser frequency stabilization; frequency modulation spectroscopy technology; laser radar

OCIS codes 140.3460; 140.3425; 010.110; 010.3640

1 引 言

气溶胶是大气中的主要微量成分之一,与大气环境、全球气候以及人体健康有着密切关系。近年

来随着人类活动越来越多,大气中的气溶胶粒子明显增多,因此对气溶胶的高精度探测与研究迫在眉睫。激光雷达技术为观测气溶胶的分布提供了有效手段。中国科学院上海光学精密机械研究所设计了

收稿日期: 2018-01-12; 收到修改稿日期: 2018-03-12

基金项目: 上海市自然科学基金(15ZR1445000)

作者简介: 杜娟(1989—),女,博士研究生,主要从事激光稳频技术方面的研究。E-mail: dujuan2014@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达、激光通信等方面的研究。

E-mail: wbchen@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: ygsun@siom.ac.cn

一套双波长高光谱分辨率气溶胶探测激光雷达系统,可以同时工作在 532 nm 和 1064 nm 两个波段,其中 532 nm 探测通道采用了高光谱分辨探测技术,要求 532 nm 激光频率稳定性优于 10 MHz。在此系统中,关键是高能量频率稳定激光器的获得。目前,高频率稳定性且高能量的激光器普遍采用种子注入脉冲振荡器及功率放大器的技术实现。因此种子激光器的频率稳定性是非常重要的。利用碘分子吸收谱线是同时实现 532 nm 和 1064 nm 波长稳定的有效并且简便的方法。自 80 年代初期, Bjorklund 提出了线性吸收的频率调制光谱技术后,基于碘分子吸收光谱实现 532 nm 波长的稳定主要有三种技术:线性吸收稳频技术^[1],饱和吸收谱技术^[2-3]和调制转移光谱技术^[4-11]。采用饱和吸收谱技术和调制转移光谱技术均可以使 532 nm 的频率稳定度达到 10^{-13} 以上,尤其是采用调制转移光谱技术可以使其频率稳定度达到 10^{-15} 量级。但是这两种技术^[2-11]对激光器和光学系统都有较高的要求,并且由于碘分子在 532 nm 波段具有很强的吸收谱线,碘分子吸收池的冷指端温度需要降到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下来减小线性多普勒背景,另外碘分子吸收池的长度通常要达到几十厘米,应用难度高、体积大。而线性吸收稳频技术,可以降低对激光功率和光学系统的要求。以上三种稳频技术都需要对激光束进行相位调制,以往研究^[1-11]均采用直接对 532 nm 波长进行相位调制,但是目前市场上 532 nm 的相位调制器主要是自由空间的体调制器,实验中需要仔细调节光路,增加了光学系统的复杂性。由于 1064 nm 光纤输入输出的波导相位调制器已非常成熟,因此

设计了一套直接对 1064 nm 进行相位调制的结构紧凑的线性吸收稳频系统。该系统中除吸收池及两个准直和聚焦透镜外,其余光学器件均为光纤输入输出型,简化了光路,减小了体积,并且激光频率稳定性满足了激光雷达高光谱探测的需求。

2 系统原理

该套线性吸收激光稳频系统采用碘分子 1109 吸收线结合频率调制光谱技术实现 1064 nm 激光器的频率稳定,其系统组成框图如图 1 所示。分布式反馈半导体激光器 (DFB-LD) 输出光波长为 1064 nm,经过隔离器避免光反馈影响激光器的单频输出特性并防止产生跳模现象,之后由光纤分束器分为两路:一路作为种子光输出;一路经过光电相位调制器 (EOM)。调制后的光频谱是由光载波与在它两边对称分布的无穷多对边频所组成^[12]。调制光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后,由周期极化铌酸锂晶体 (PPLN) 倍频产生 532 nm 光。倍频的 532 nm 激光通过准直镜 (len1) 进入碘分子吸收池。再由聚焦镜 (len2) 聚焦到光电探测器 (PD) 转换为探测电信号进行测量。射频板提供两路射频信号:一路为 EOM 提供射频调制信号,另一路射频信号经过相位延迟后与探测器转换的电信号进行混频解调得到误差信号。通过利用误差信号中间的线性变化区域,经比例、积分 (PI) 伺服控制系统分成两路调节 DFB 激光器的输出光频率:一路为快信号,通过改变激光器的驱动电流快速调节激光频率;一路为慢信号,通过改变激光器的工作温度以补偿激光频率的长期漂移。

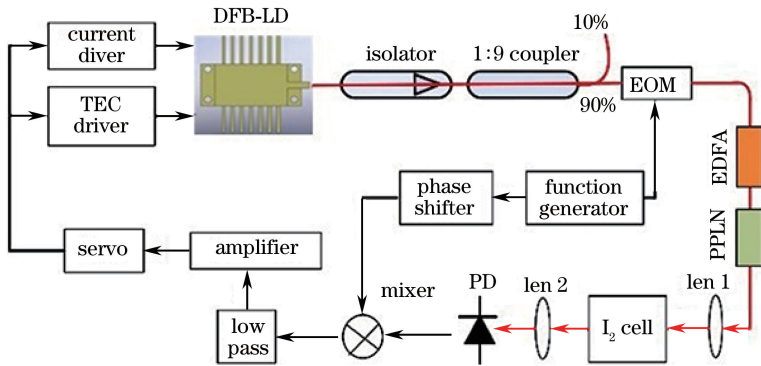


图 1 小型化碘稳频 1064 nm 半导体激光器稳频原理图

Fig. 1 Schematic of frequency stabilization of the miniaturized iodine-stabilized 1064 nm semiconductor laser

设角频率为 ω 的激光经过 EOM 进行相位调制后,可以表示为

$$E_m = |E_0| \exp[i\omega t + \beta \sin(\Omega t)], \quad (1)$$

式中 E_0 为 EOM 的入射光电场强度; β 为调制深度; Ω 为调制角频率; E_m 为调制输出光的电场强度; t 为时间。(1)式可用贝塞尔函数展开为

$$E_m = |E_0| \exp(i\omega t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\Omega t), \quad (2)$$

式中 $J_n(\beta)$ 为 n 阶贝塞尔函数。当调制光经过 EDFA 放大器进入 PPLN 晶体中, 由于非线性效应^[13], 在 PPLN 晶体中将会发生和频及倍频两种情况, 为简化模型, 以小信号近似理论解释为

$$E'[2\omega + (n+m)\Omega] = \frac{[2\omega_0 + (n+m)\Omega]^2 z}{2k_{2\omega+(n+m)\Omega} c^2} \times |\chi_{\text{eff}}^{(2)}| E(\omega + m\Omega) E(\omega + n\Omega) = \sum_{n,m=-\infty}^{+\infty} C_{2\omega+(n+m)\Omega} |E_0|^2 J_m(\beta) J_n(\beta) \times \exp\{i[2\omega + (n+m)\Omega]t\}, \quad (3)$$

式中 $C_{2\omega+(n+m)\Omega} = \frac{[2\omega_0 + (n+m)\Omega]^2 z}{2k_{2\omega+(n+m)\Omega} c^2} |\chi_{\text{eff}}^{(2)}|$; z 为 PPLN 晶体的长度; χ_{eff} 为晶体有效非线性极化率; c 为光速, k 为相应光频率波矢。 n, m 取负无穷到正无穷间的整数值, 则设经过 PPLN 后的光波场可表示为

$$E_d = \frac{1}{2} C_{2\omega} |E_0|^2 J_0(\beta)^2 \exp(i2\omega_0 t) + \frac{1}{2} \sum_{n,m=-\infty}^{+\infty} C_{2\omega+(n+m)\Omega} |E_0|^2 J_m(\beta) J_n(\beta) \times \exp\{i[2\omega + (n+m)\Omega]t\}. \quad (4)$$

倍频光进入长度为 L 的碘分子吸收池, 由于碘分子对光强的吸收满足比尔-朗伯定律, 输出光的光强可以表示为

$$P_{\text{out}} = |E_d F(\omega)|^2, \quad (5)$$

$$F(\omega) = A(\omega) B(\omega), \quad (6)$$

式中 $A(\omega) = \exp[\alpha(\omega)L/2]$ 反映碘分子的吸收特性; $B(\omega) = \exp(-i\omega nL)$ 反映其色散特性。由于每一频率分量的吸收和色散不同, 因而导致出射光强会随时间变化。由于仅在调制频率处进行相干解调, 因此可以忽略高次项的贝塞尔函数值, 仅保留一次项。另外当 m, n 取值不大时, $\omega \gg (n+m)\Omega$, 则可以假定 $C_{2\omega} \approx C_{2\omega+(n+m)\Omega} = C$ 。通过碘分子吸收池后, 光强信号可以简化为

$$P_{\text{out}} = 2 |E_0|^4 \cos(\Omega t) C \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(\beta)^3 \times J_{n+1}(\beta) \text{Re}\{F(\omega + n\Omega) F^*[\omega + (n+1)\Omega] - F^*(\omega - n\Omega) F[\omega - (n+1)\Omega]\} + 2 |E_0|^4 \times \sin(\Omega t) C \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(\beta)^3 J_{n+1}(\beta) \times \text{Im}\{F(\omega + n\Omega) F^*[\omega + (n+1)\Omega] - F^*(\omega - n\Omega) F[\omega - (n+1)\Omega]\}. \quad (7)$$

激光经过碘分子吸收池加载上频率信息, 被光

电探测器接收转化为电信号, 经过滤波放大和相干解调得到仅与吸收特性成正比的误差信号, 可以表示为

$$I \propto \sum_{n=0}^{+\infty} J_n(\beta)^3 J_{n+1}(\beta) \{A(\omega - n\Omega) + A[\omega - (n+1)\Omega] - A(\omega + n\Omega) - A[\omega + (n+1)\Omega]\}, \quad (8)$$

(8) 式表示在确定的调制频率和调制度下, 得到误差控制信号随激光频率的变化而变化的特性。但对不同的调制频率和调制度, 误差信号的斜率和波形也大不相同。为便于分析, 假定碘分子吸收线型为多普勒线型, 定义归一化频率为 $R(\omega) = 2\sqrt{\ln 2} \Delta/\Gamma$, $\Delta = \omega - \omega_0$, 其中 ω_0 为吸收谱线中心角频率, Γ 为吸收谱线的半高全宽。当 $\omega = \omega_0$ 时, 吸收系数为 $A_{\text{peak}} = \exp[\alpha(\omega_0)L/2]$, 则当激光频率偏离多普勒谱线中心频率时的吸收系数可以表示为 $A = A_{\text{peak}} \exp[-R^2(\omega)]$ 。图 2 显示利用 (8) 式得到的在调制度为 2, 调制频率不同时的误差信号。图 3 所示为在调制频率为 0.3Γ , 调制深度不同时的误差信号。从这两幅图可知调制频率和调制深度过高将会引起误差信号的畸变。这是因为调制频率过大甚至超过碘分子吸收谱线宽度时, 两吸收峰之间将出现一段平直的区域^[14]。当调制深度较大时, 由调制产生的正负边频的幅度会不一样, 将引起剩余振幅调制现象, 同样不利于稳频^[15]。另外调制频率和调制深度的选取, 不仅应兼顾线性度还应考虑误差信号斜率。图 4 所示为误差信号斜率随调制频率和调制深度变化的情况。经过计算分析, 当调制频率为 $0.1 \sim 0.3\Gamma$ 、调制深度为 $2.5 \sim 3$ 时, 能获得较好的误差控制信号, 可作为在 1064 nm 激光器频率稳定系统设计时选取调制频率和调制度的最佳范围。

在开展模型仿真过程中, 假设了碘分子吸收谱线

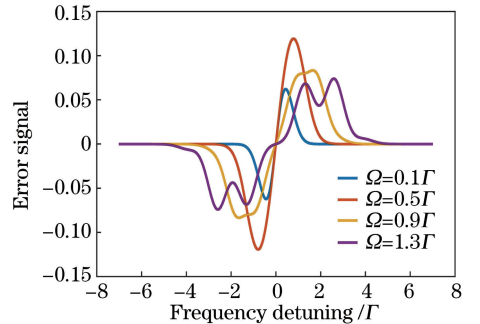


图 2 调制深度为 2 时, 不同调制频率下的误差信号
Fig. 2 Error signal at different modulation frequencies when modulation depth is 2

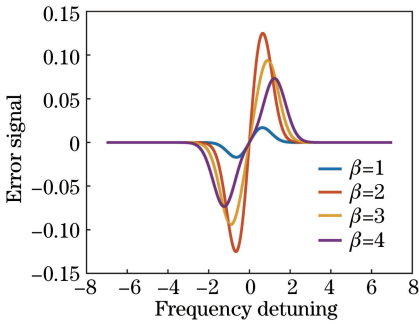


图3 调制频率为 0.3Γ 时,不同调制深度下的误差信号

Fig. 3 Error signal at different modulation depths when the modulation frequency is 0.3Γ

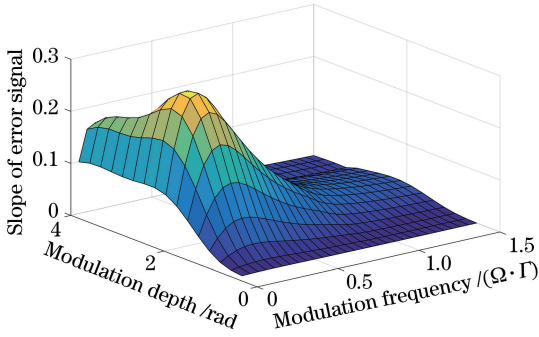


图4 误差信号斜率随调制频率和调制深度的变化情况

Fig. 4 Error signal's slope varies with the modulation frequency and modulation depth

是多普勒加宽线型,但实际上碘分子的吸收线型具有微小的不对称性。另外,在稳频系统模型仿真中假定了在同一温度下对不同频率的激光,倍频效率是相同的,但实际倍频效率与激光波长相关,因此如果需要更精确的仿真结果,需要对倍频晶体的效率及碘分子的吸收线型进行更加精确的分析和测量。

3 实验结果

在上述仿真计算结果的基础上,设计并完成了一套小型化的 1064 nm 半导体稳频激光器。DFB 激光器采用 QDLaser 公司的半导体激光器,输出光波长为 1064.52 nm,输出连续光功率为 25 mW。电光相位调制器采用 140 MHz 的 EOM。调制光经过自制的掺铒光纤放大器放大后,输出光功率为 120 mW。经过 PPLN 倍频后输出波长为 532.26 nm,光功率为 6.4 mW。碘分子吸收池为圆柱体,尺寸为 50 mm×25 mm。碘分子吸收池为石英玻璃密封烧制而成,分为碘泡和碘指两部分。在安装过程中用锡箔纸对其泡壁进行适当包裹再安装于系统结构中,可以起到缓冲作用。安装结构示意图如图 5 所示。碘泡的温度设定为 30 °C,碘指温度

为 25 °C,利用半导体致冷器(TEC)控制温度,温控精度为±1 °C。在此温度下,碘分子吸收线的多普勒谱线宽度约为 1 GHz,根据仿真结果,实验中调制频率和调制深度分别设为 140 MHz 和 3。图 6 给出了实验中碘分子吸收线以及相应的误差信号。为了评价小型化 1064 nm 激光器输出频率的稳定性,实验使用一台高精度的波长计(WS-7, high finesse)进行实时监测,绝对频率测量结果如图 7 所示。稳频后的激光器在 30 min 测量时间内频率抖动的均方根(RMS)值小于 0.3 MHz。图 8 为图 7 稳频激光器实验结果对应的阿伦偏差曲线,由图可知其 10000 s 的阿伦偏差小于 0.1 MHz,满足了高光谱气溶胶探测激光雷达对种子激光器频率稳定性的需求。

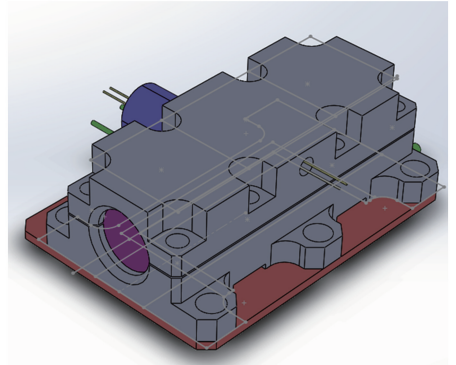


图5 碘分子吸收池的安装结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the installation structure of iodine molecular absorption cell

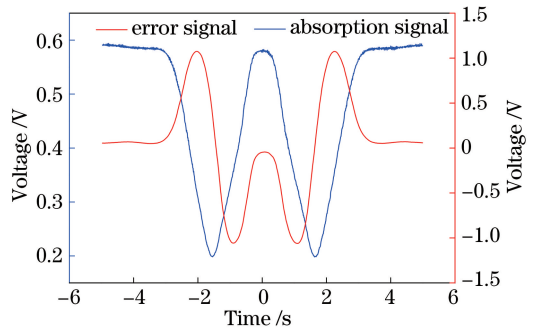


图6 碘吸收谱线及相应的误差信号

Fig. 6 Iodine absorption spectrum and corresponding error signal

4 结 论

为实现气溶胶高光谱分辨探测激光雷达的应用,基于理论模型建立仿真并设计了一套小型化碘稳频的 1064 nm 半导体种子激光器。系统中除准直镜、聚焦镜和碘分子吸收池外,其他光学器件均为

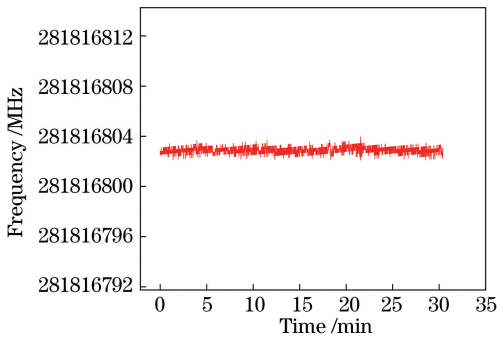


图 7 激光器稳频性能

Fig. 7 Frequency stabilization performance of the laser

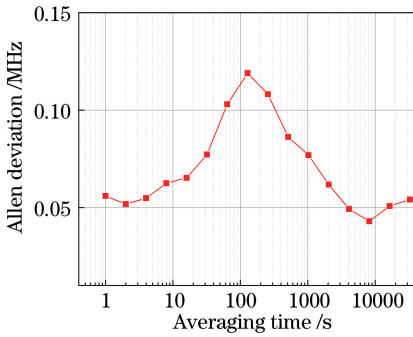


图 8 阿伦偏差

Fig. 8 Allan deviation

光纤输入光纤输出型,降低了光路的复杂性,另外实验中使用的碘分子吸收池长度仅为 50 mm,远小于以往文献中使用的吸收池,减小了体积,便于搬运。通过使用高精度的波长计对稳频激光器波长进行测量,实现了频率抖动的 RMS 值小于 0.3 MHz,频率变化阿伦偏差在 10000 s 时小于 0.1 MHz,满足了气溶胶探测激光雷达的需求。该稳频 1064 nm 激光器的长期频率稳定性高,可以进一步作为直接探测测风激光雷达的种子激光器。

参 考 文 献

[1] Arie A, Byer R L. Frequency stabilization of the 1064-nm Nd:YAG lasers to Doppler-broadened lines of iodine[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(36): 7382-7386.

[2] Arie A, Byer R L. Laser heterodyne spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532 nm[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(11): 1990-1997.

[3] Arie A, Schiller S, Gustafson E K, *et al.* Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(17): 1204-1206.

[4] Ye J, Robertsson L, Picard S, *et al.* Absolute

frequency atlas of molecular I_2 lines at 532 nm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(2): 544-549.

[5] Ye J, Ma L S, Hall J L. Molecular iodine clock[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(27): 270801.

[6] Zang E J, Cao J P, Li Y, *et al.* Realization of four-pass I_2 absorption cell in 532-nm optical frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2): 673-676.

[7] Nyholm K, Merimaa M, Ahola T, *et al.* Frequency stabilization of a diode-pumped Nd:YAG laser at 532 nm to iodine by using third-harmonic technique [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(2): 284-287.

[8] Schuldt T, Braxmaier C, Müller H, *et al.* Frequency stabilized Nd:YAG laser for space applications [C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics (ICSO 2004)*, Toulouse, France. Ed.: B. Warmbein. ESA SP-554: 2004, 611-617.

[9] Acef O, Clairon A, du Burck F, *et al.* Nd:YAG laser frequency stabilized for space applications [C]. *International Conference on Space Optics*, Rhodes, Greece, 2010.

[10] Lin B K, Cao S Y, Zhao Y, *et al.* A compact iodine-stabilized solid-state laser at 532 nm [J]. *Chinese Journal of 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.

[11] Su J, Jiao M X, Ma Y Y, *et al.* Design of Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization system using the quadrature demodulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0316001. 苏娟, 焦明星, 马源源, 等. 正交解调 Pound-Drever-Hall 激光稳频系统设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0316001.

[12] Lan X J. *Laser technology* [M]. Beijing: Science Press, 2000. 蓝信钜. *激光技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[13] Shi S X, Chen G F, Zhao W, *et al.* *Nonlinear Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. *非线性光学* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.

[14] Li J, Bai X D, Shen N C, *et al.* The parameters optimization of Doppler-broadened iodine at 532 nm Nd:YVO₄ laser frequency stabilization [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 50-52. 李坚, 白晓东, 沈乃激, 等. 碘分子 532 nm 激光稳频系统的参数优化[J]. *激光技术*, 2003, 27(1): 50-52.

[15] Eble J F, Schmidt-Kaler F. Optimization of frequency modulation transfer spectroscopy on the calcium 4^1S_0 to 4^1P_1 transition [J]. *Applied Physics B*, 2007, 88(4): 563-568.