

# 微型 Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器在碘分子调制转移光谱中的应用\*

毕志毅 罗 明 丁晶新 马龙生

(华东师范大学物理系 国家教育部量子光学开放实验室, 上海 200062)

**摘 要** 以半导体激光器抽运微型 Nd·YVO<sub>4</sub> 倍频激光器为光源获得碘分子在 532 nm 处的光外差调制转移光谱信号, 并对获取最佳稳频信号的实验条件进行了讨论。

**关键词** 调制转移光谱, Nd·YVO<sub>4</sub> 全固体化激光器, 稳频激光器

## 1 引 言

光外差调制转移光谱(MTS)是采用射频调制激光场、光相干探测及相敏解调,通过非线性介质近简并四波混频过程实现信号从射频调制光束向未调制光束转移的光谱技术,具有高灵敏度、高分辨率和无多普勒背景等特点<sup>[1~4]</sup>,属于当前国际上最先进的激光稳频技术之一。利用调制转移光谱技术已成功研制成高质量高精度稳频的 Nd·YAG 稳频激光器<sup>[5~9]</sup>。目前,以激光二极管抽运小型 Nd·YVO<sub>4</sub> 固体激光器引起了人们的高度重视<sup>[10,11]</sup>,并用它获得了碘分子调制转移光谱<sup>[12]</sup>。本文以微型 Nd·YVO<sub>4</sub> 固体激光器为光源,探索它在研制小型高精度稳频激光器中的应用,在 532 nm 处获得了具有良好信噪比和鉴频特性的 I<sub>2</sub> 调制转移光谱线。

## 2 Nd·YVO<sub>4</sub> 全固体化激光源

实验采用的激光器结构如图 1 所示。激光二极管输出 809 nm 激光经透镜聚焦在 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体上, 1064 nm 红外激光腔由曲率半径为 30 mm 的凹面镜 M<sub>1</sub> 和 KTP 晶体输出平面组成。红外激光经 KTP 晶体倍频产生 532 nm 绿光输出。M<sub>1</sub> 的外表面镀有 809 nm 增透膜,内表面镀有 1064 nm 高反、809 nm 增透的双色膜,安装在片状压电陶瓷(PZT)上,用于腔长微调。KTP 晶体的一个面镀有 1064 nm 的增透膜,另一个面镀有 1064 nm 高反和 532 nm 增透的双色膜,兼作谐振腔端面高反镜和

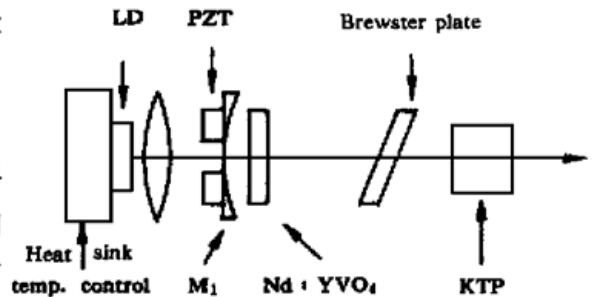


Fig. 1 The structure of Nd·YVO<sub>4</sub> solid state laser

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69778021)和上海市科学技术发展基金资助项目(项目编号: 98JC14007)。

532 nm 的输出耦合镜, 激光器腔长为 25 mm。 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  晶体掺 Nd 的原子数分数为 0.011, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 1 mm, KTP 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,  $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$  与 KTP 晶体安装在同一紫铜块上, 其温度可精密调节。

### 3 实验装置

频率为  $\omega$  的光束经相位调制器调制后其频率成分包括载波 ( $\omega$ ) 和调制边带 ( $\omega \pm n\delta$ ,  $\delta$  为调制频率,  $n$  取自然数)。这样的一束调制光和另一束未经调制的光以相反方向入射到介质上时, 在介质的非线性三阶极化率作用下, 经过四波混频过程, 会在原来未调制光束中产生新的边带, 这个新的调制边带可以看作是调制光束中的边带转移到未调制光束上产生的(故称为调制转移)。对原来未调制的光束和新产生的边带进行光外差相干检测, 产生的外差拍频电流再经双平衡混频器在调制频率处解调, 这样就获得了光外差调制转移光谱信号。

调制转移光谱实验装置如图 2 所示。激光器输出光束经  $\lambda/2$  波片及偏振分束棱镜  $\text{PBS}_1$  获得两束偏振方向相互垂直且相对强度比可调的光束。其中一束依次通过声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)和偏振分束棱镜  $\text{PBS}_2$  作为调制光束, 与另一非调制光束反向同轴通过长度为 40 cm 的  $\text{I}_2$  样品池。在  $\text{I}_2$  非线性四波混频作用下实现信号边带由调制光束向非调制光束的转移过程。非调制光束和新产生的调制边带经偏振分束棱镜  $\text{PBS}_2$  导入光电探测器, 获得拍频光电流。通过前置放大及双平衡混频器(DBM)解调, 获得  $\text{I}_2$  调制转移光谱信号。光路中声光调制器用于光隔离, 驱动频率为 80 MHz。光相位调制器(EOM)采用  $\text{MgO} \cdot \text{LiNbO}_3$  晶体, 调制频率  $\delta$  为 312.5 kHz。样品池内气压由半导体制冷器控温来调整。改变激光晶体的温度, 可在大范围内对激光频率调谐, 用压电陶瓷改变激光器腔长实现频率精细扫描。

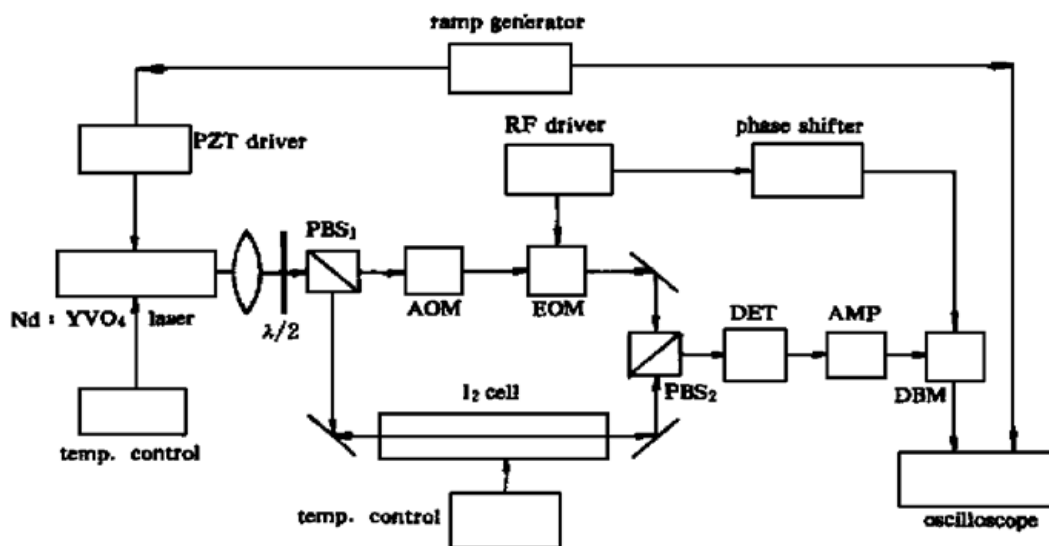


Fig. 2 The experimental setup of modulation transfer spectroscopy

### 4 实验结果

$\text{I}_2$  在 532 nm 处的谱线属于  $X^1\Sigma_g^+$  基态到  $B^3\Pi_{0u}^+$  激发态的跃迁。对于转动量子数  $J$  奇偶不同, 碘分子超精细结构具有不同的谱线组合特征和条数。

图 3(a)、图 3(b) 记录的信号谱线分别为  $P(46) 32-0$  (波数为  $18799.32 \text{ cm}^{-1}$ ) 和  $R(49) 32-0$  ( $18799.24 \text{ cm}^{-1}$ ) 的跃迁, 分别对应为转动量子数  $J$  为偶数和奇数时分裂的 15 和 21 条超

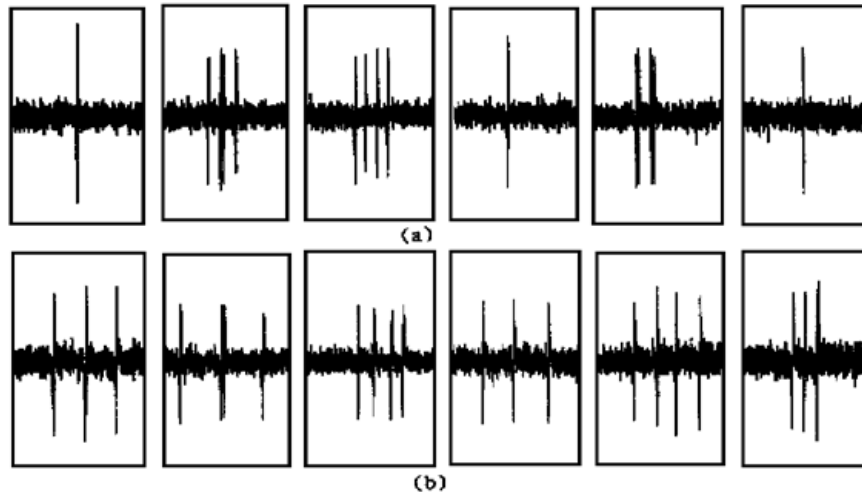


Fig. 3 Modulation transfer spectrum of I<sub>2</sub> ( $\delta = 312.5$  kHz,  $B = 10$  kHz). (a)  $P(46)$  32-0 transition of I<sub>2</sub>; (b)  $R(49)$  32-0 transition of I<sub>2</sub>

精细结构。

为了能反映谱线的线型结构,将图 3 中的一条谱线展宽,结果如图 4 所示,可见信号具有良好的鉴频特性。

实验条件:激光输出功率为 5 mW,样品池输入镜处调制光束的功率为 1 mW,未调制光束功率为 0.1 mW,样品温度为  $-8$  °C,对应气压为 1.72 Pa。信噪比 15 (检测系统低通滤波器带宽  $B$  为 10 kHz)。



Fig. 4 The lineshape of modulation transfer spectrum

## 5 讨 论

### 5.1 光源单模运行

为获得具有高分辨率及良好信噪比的调制转移光谱线,首先必须保证激光源单纵模运行。环型腔激光器和扭转模腔激光器可以满足这一要求,但其结构复杂且调试麻烦<sup>[13]</sup>。而采用双镜腔结构的半导体激光抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> 腔内倍频小型激光器,结构简单紧凑且易于调整,已引起了不少实验室的高度重视<sup>[12]</sup>,其缺点是单频扫描特性差,不易获得高质量的光谱信号。本实验由于采用了下述一些措施使得该激光器具有良好的单纵模运行特性,因而获得了很好的调制转移光谱信号。

如图 1 所示,由布儒斯特片和 KTP 倍频晶体形成的双折射滤波器<sup>[14]</sup>,使不同波长的模式在腔内运行时对应不同的损耗,因而具有选模效应。根据所用 KTP 晶体长度及在波长为 1064 nm 的折射率分布,满足无损耗条件的纵模间隔为 348 GHz,大于 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的增益带宽(掺原子数分数为 0.011 的 Nd 的 YVO<sub>4</sub> 晶体,增益带宽为 257 GHz<sup>[15]</sup>),有助于激光的单模运行。除了上述双折射滤波器的作用,激光器的短腔(25 mm)结构和采用 Nd·YVO<sub>4</sub> 薄片增益介质并置于输入耦合镜 M<sub>1</sub> 附近也是本激光器实现良好单频运行的原因<sup>[16]</sup>。虽然 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的吸收带宽值大,对抽运源的波长变化不如 Nd·YAG 敏感,但由于 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的温度特性<sup>[11]</sup>和采用短腔体结构,使激光频率受温度波动及腔长变化的影响变得极为显著。实验中采用高精度温控器控制 Nd·YVO<sub>4</sub> 及 KTP 晶体的温度和低纹波系数的高压电源驱动压电陶瓷扫描以及绝热防震的激光器结构,以确保激光器输出波长稳定。实验显示,在激光器自由

运行状态下,超精细结构谱线在 1 分钟内漂移小于 20 MHz。几个月运行下来,每天开机后都能调整到如图 3 所示的谱线位置。

## 5.2 光谱线型与信噪比

选择合适的激光射频相位调制频率值,获得具有高信噪比和最佳鉴频特性的调制转移光谱信号,直接关系到激光稳频系统锁定精度和快速响应特性。理论计算表明<sup>[4]</sup>,当调制频率  $\delta$  与分子吸收半线宽  $\gamma$  之比  $\delta/\gamma$  约为 0.7 时,可获得具有最大信号幅度及信号中心斜率的光谱线。但是由于抽运光的强度噪声等影响,使激光器 532 nm 输出在低频区段的幅度噪声远大于量子噪声,测量显示激光幅度噪声主要分布在 1 MHz 以下区域,如图 5 所示。比较 300 kHz 及 1 MHz 两点幅度噪声相差约 20 dB。实验中

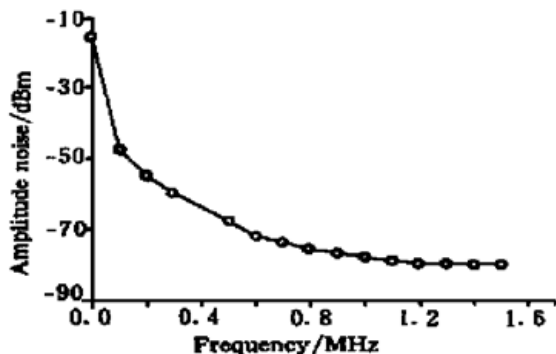


Fig. 5 The spectrum of laser amplitude noise

中将电光晶体的调制频率换为 1.25 MHz,并调节样品气压使输出谱线线型最适于激光稳频的形态 ( $T \approx 16^\circ\text{C}$ ,  $P \approx 18.7\text{ Pa}$ ),测得调制转移光谱信号如图 6 所示。图 3 和图 6 对应相同的谱线位置。与图 3(调制频率  $\delta$  为 312.5 kHz)相比,信噪比约提高 5 倍。由于信噪比提高,图 6 已能清楚看到强度较小的其他组的超精细结构。

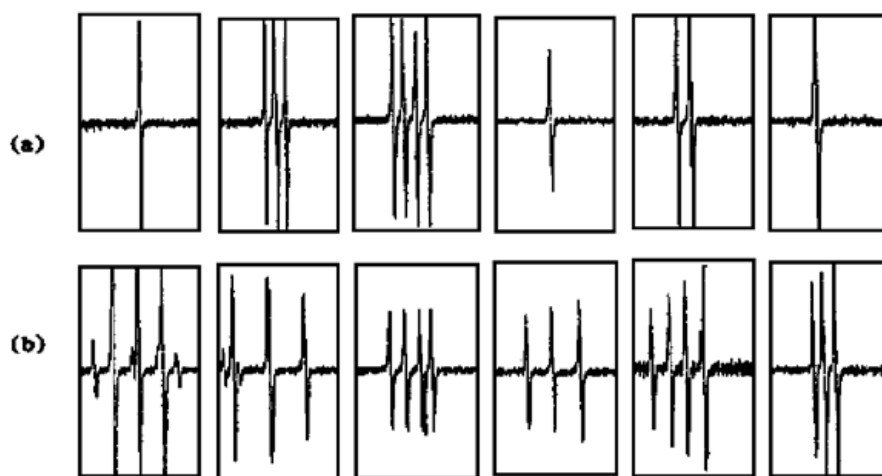


Fig. 6 Modulation transfer spectrum of  $\text{I}_2$  ( $\delta = 1.25\text{ MHz}$ ,  $B = 10\text{ kHz}$ ).

(a)  $P(46)$  32-0 transition of  $\text{I}_2$ ; (b)  $R(49)$  32-0 transition of  $\text{I}_2$

从获取调制转移光谱信号来说,选用大于 1 MHz 的调制频率不失为避免幅度噪声影响、提高光谱信噪比的有效方法。但提高调制频率就要通过增加吸收线宽来保证线型适用于稳频,从而导致光谱线型中心斜率减小,不一定有利于激光稳频系统锁定精度<sup>[4]</sup>的提高。因此,应考虑提取激光功率变化参考信号并采用光电负反馈技术控制激光二极管注入电流或差分信号检测等方法,以减小激光幅度噪声对检测信号的影响。

**小结** 实验以激光二极管抽运微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 倍频激光器为光源,获得碘分子在 532 nm 处的光外差调制转移光谱信号,并用该信号作为鉴频信号,成功实现对激光频率的锁定,这对进一步研制小型全固化稳频激光器具有重要意义。

**致谢** 感谢华东师范大学顾问教授、美国 NIST and JILA, University of Colorado 高级研究员 J. L. Hall 博士对该项目的帮助。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Raj R K, Bloch D, Snyder J J *et al.*. High-frequency optical heterodyne saturation spectroscopy via resonant degenerate four-wave mixing. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **44**( 19 ): 1251~ 1253
- [ 2 ] Shirley J H. Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy. *Opt. Lett.*, 1982, **7**( 11 ): 537~ 539
- [ 3 ] Ma L S, Hall J L. Optical heterodyne spectroscopy enhanced by an external optical cavity: toward improved working standards. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**( 11 ): 2006~ 2012
- [ 4 ] 毕志毅, 马龙生, 丁良恩. 调制转移光谱线型的理论计算. *物理学报*, 1993, **42**( 4 ): 582~ 591
- [ 5 ] Ma L S, Hollberg L, Shirley J H *et al.*. Modulation transfer spectroscopy for stabilizing laser. United States Patent 4590597, May 26, 1986
- [ 6 ] Eickhoff M L, Hall J L. Optical frequency standard at 532 nm. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1995, **44**( 2 ): 155~ 158
- [ 7 ] Hall J L, Ma L S, Taubman M *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I<sub>2</sub>-stabilized Nd·YAG laser. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1999, **48**( 2 ): 583~ 586
- [ 8 ] Ye Jun, Robertsson L, Picard S *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular I<sub>2</sub> lines at 532 nm. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1999, **48**( 2 ): 544~ 549
- [ 9 ] Hong F L, Ishikawa J, Yoda J *et al.*. Frequency comparison of <sup>127</sup>I<sub>2</sub> stabilized Nd·YAG Lasers. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1999, **48**( 2 ): 532~ 536
- [ 10 ] Kitaoka Y, Ohmori S, Yamamoto K *et al.*. Stable and efficient green light generation by intracavity frequency doubling of Nd·YVO<sub>4</sub> lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**( 3 ): 299~ 301
- [ 11 ] 王常青, 沈德元, 邵宗书 等. 激光二极管泵浦高效 Nd·YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器. *光学学报*, 1996, **16**( 10 ): 1393~ 1396
- [ 12 ] Shen Naicheng, Zang Er Jun, Cao Hongjun *et al.*. Modulation transfer spectroscopy of <sup>127</sup>I<sub>2</sub> hyperfine structure near 532 nm using a self-made diode-pumped Nd·YVO<sub>4</sub>-KTP laser. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 1999, **48**( 2 ): 604~ 607
- [ 13 ] Nagai H, Kume M, Ohta I *et al.*. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd·YAG laser using a Brewster plate. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1992, **QE-28**( 4 ): 1164~ 1168
- [ 14 ] Taira T, Mukai A, Nozawa Y *et al.*. Single-mode oscillation of laser-diode-pumped Nd·YVO<sub>4</sub> microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**( 24 ): 1955~ 1957
- [ 15 ] Kintz G J, Baer T. Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**( 9 ): 1457~ 1459
- [ 16 ] 戴特立. 半导体二极管泵浦固体激光器. 成都: 四川大学出版社, 1993

## Modulation Transfer Spectrum Using Nd·YVO<sub>4</sub> Minilaser

Bi Zhiyi Luo Ming Ding Jingxin Ma Longsheng

(Department of Physics, Laboratory for Quantum Optics, East China Normal University, Shanghai 200062)

(Received 9 November 1999; revised 27 March 2000)

**Abstract** Modulation transfer spectrum of I<sub>2</sub> were obtained at 532 nm using diode-pumped Nd·YVO<sub>4</sub> minilaser. The experimental parameters to optimize servo signal for laser frequency stabilization has been discussed.

**Key words** modulation transfer spectroscopy, Nd·YVO<sub>4</sub> solid state laser, frequency stabilized laser