

Nd:YVO₄/KTP 激光碘分子超精细光谱和稳频研究

臧二军¹ 曹建平¹ 李成阳¹ 沈乃激¹ 彭月祥² 左爱斌² 李 晔²

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100013) (2. 北京交通大学物理系, 北京 100044)

摘 要:用 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频环形激光器产生的 532nm 波长激光, 探测到了波长在 532.170nm 至 532.200nm 范围的一系列碘的多普勒吸收谱线和饱和吸收谱线。理论计算出相应的波长值和超精细谱线结构参数。理论计算值与实验测量数据在较高的精度内相一致。用三次谐波锁定的稳频电路实现了该激光器在碘饱和吸收线超精细分量上的频率稳定。

关键词:激光; 碘分子; 光谱; 稳频

中图分类号:TH744.5

文献标识码:A

0 引言

在可见光波段, 碘分子有非常丰富的吸收谱线, 可作为激光频率稳定的自然基准, 在红光波段, 碘分子跃迁的下能级是受激态, 例如, 能级为 3, 4 或 5, 该能级上分布的粒子数比较少, 跃迁能级间粒子数差小, 因此吸收系数不是很大。而在 532nm 波段, 吸收谱线的下能级是基态, 吸收对应 0 至上能级(例如, 32~38 范围)的跃迁, 能级间的粒子数差很大, 因而具有很大的吸收系数。用这些谱线作为激光稳频的参考谱线, 可以获得谱线宽度窄和信噪比高的吸收信号, 从而得到很高的频率稳定性和复现性。

20 世纪 90 年以来, 用 532nm Nd:YAG 激光器检测了多组碘吸收谱线的超精细结构分量, 并用调频技术和调制转移光谱(MTS)法实现了激光的频率稳定^{[1]~[6]}。1997 年, 国际长度咨询委员会(CCL)推荐了九组碘吸收谱线作为复现米定义的参考^[7], 其中用 R(56)32-0 作为标准谱线, 推荐了它的频率值。在 2001 年的推荐表中^[8], 这组谱线已用稳频的飞秒激光器测量了绝对频率值, 其频率不确定度在 1×10^{-11} 量级。

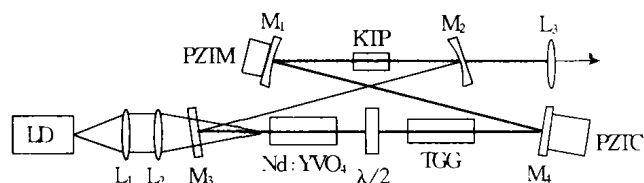
532nm Nd:YVO₄ 激光器与 532nm Nd:YAG 激光器相比, 具有结构简单, 价廉物美的优点, 其频率稳定度也能达到 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 量级, 更便于在精密测量领域内推广应用。本文报道采用碘吸收谱线检测和频率稳定用的小功率单频的 532nm 波长的 Nd:YVO₄/KTP 激光器, 检测到一系列新的碘分子的超精细吸收谱线, 并在其中一些谱线上实现了激

光的频率稳定。

1 单频 532nm 波长 Nd:YVO₄/KTP 环形固体激光器

单模单频输出是对用于谱线探测和频率稳定的激光器的基本要求。环形激光器与直腔激光器相比具有更好的单频调谐特性, 因此更有利于检测碘的饱和吸收谱线。图 1 实验采用的环形激光器光路示意图。采用中科院半导体所的 2W 商品半导体激光器 LD 作为泵浦光源。中心波长为 809nm, 发射孔径为 $1 \times 200 \mu\text{m}$ 。为了有效利用激光功率并简化泵浦光学系统, 我们在半导体激光器内部装上了镀有增透膜的微型透镜。经过该透镜后, 功率损耗约为 1~5%, 在平行与垂直于半导体激光器的发射结的方向上, 光束发散角 $\theta_{\perp} \times \theta_{\parallel} = 8^{\circ} \times 8^{\circ}$ 。经过准直透镜 L_1 、 L_2 和 L_3 后, 使 LD 的输出为接近圆形的一个聚焦点, 其直径约为 $35 \mu\text{m}$ 。808nm 泵浦激光入射在长度为 5mm 的 Nd:YVO₄ 激光晶体上, 该晶体的 Nd³⁺ 的掺杂浓度为 0.5%, 激光晶体的 c 轴与泵浦激光的偏振方向相匹配。利用钕铁硼磁铁对磁光晶体 TGG 施加轴向磁场, $\lambda/2$ 波片与 TGG 磁光晶体组成光学单向器, 以实现单向环形激光运转。反射镜 M_1 上装有 5mm 长度的压电陶瓷 PZT 以实现调制和快速调谐, 反射镜 M_4 上装有 15mm 长的 PZT 实现激光频率控制。长度为 5mm 的 KTP 晶体用于腔内激光频率倍频。反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 组成四镜环形激光谐振腔, 其中 M_1 是做出抽运激光的输入镜, M_2 是 532nm 激光的输出镜, 透镜

L_3 用于输出光束准直,使之成为接近平行的光束。激光晶体和倍频晶体分别安装在铜制热沉上,通过 TEC 半导体致冷器分别进行精密温度控制。通过改变单块晶体的温度可以调谐激光频率。通过调节泵浦半导体激光器的驱动电流,也可在较小范围内对激光频率进行调谐。

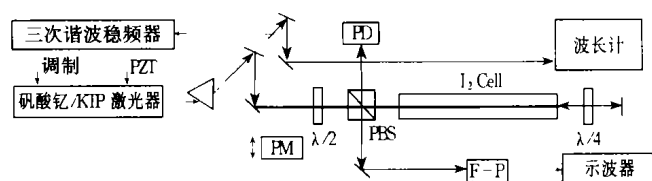


图中: LD: 激光二极管; L_1 , L_2 泵浦准直透镜; L_3 : 输出准直透镜; M_1 , M_2 , M_3 , M_4 : 激光谐振腔镜; Nd:YVO₄: 激光晶体; $\lambda/2$: 二分之一波片; TGG: 磁光晶体; PZIM: 调制压电陶瓷; PZTC: 反馈控制压电陶瓷; KTP: 倍频晶体。

图1 环形激光器示意图

反射镜 M_1 和 M_2 的曲率半径约为 37mm, 谐振腔长约为 270mm。这时 1064nm 激光的纵模间隔为 1GHz。532nm 激光的纵模间隔约为 2GHz, 532nm 的单频输出功率在 10mW 至 20mW 之间。通过加在镜子 M_4 的 PZT 施加直流偏置电压, 可以实现激光连续调谐, 而在镜子 M_1 的 PZT 上可以施加交流电压, 使激光可以产生调制信号, 提供三次谐波(简称 3f)锁定法检测和快速控制时使用。

采用 532nm 波段的 F-P 扫描干涉仪观测激光模式。实验表明, 在多数调谐范围内, 均观测到激光的单横模和单纵模运行, 即实现了激光在连续调谐时的单频输出。这是作为观测碘的饱和吸收谱线的必要条件。



图中: PD: 光电探测器; PM: 功率计; PBS: 偏振分束镜; I_2 Cell: 碘室
图2 三次谐波方法实现碘吸收谱线的探测和激光频率稳定

2 碘饱和吸收谱线的检测

实验中采用 3f 方法检测碘的饱和吸收谱线。图2给出了观测光路和原理。Nd:YVO₄/KTP 单频激光器的输出光束经棱镜分光后, 其 532nm 波长的绿光部分经反射镜反射后, 一束输入至自制的激光波长计内, 检测其调谐时的激光真空波长值。另

一束绿光经 $\lambda/2$ 波片后进入偏振分光镜 PBS, 经 PBS 后一束进入碘室, 经 $\lambda/4$ 波片和全反射镜原光路返回, 然后反射至光电二极管 PD 上, 经光电转换后的带有碘饱和吸收信号的电信号进入 3f 稳频电路。从 PBS 反射的另一束光经扫描干涉仪后, 其电信号输出馈入示波器, 可以监测激光的纵模信号, 使其保持单频输出。实验中采用的碘吸收室的长度为 400mm, 碘室温度控制在 $8^\circ\text{C} \pm 0.01^\circ\text{C}$ 。稳频器调制频率约为 3kHz。实验中 532nm 波长激光功率为 5mW。光束直径为 1mm。

为了预计并确认所检测的碘吸收谱线的波长, 可从理论上计算预期碘的多普勒吸收谱线的真空波长值。由于 Nd:YVO₄ 的激光频率区域位置略高于 Nd:YAG 的频率位置, 其激光输出波长通常可比国际上推荐的 Nd:YAG 激光的波长更短, 即小于 532.245nm。在实验中, 利用七位数字的激光波长计对吸收峰处波长值进行了测量。表1给出了理论上计算的碘吸收线的波长值和实验测量值, 计算值可估计到七位数字, 恰好与波长计的测量值相对照。

表1 532nm Nd:YVO₄/KTP 激光与
碘吸收谱线符合的真空波长值(单位: nm)

谱线	跃迁分支	计算的真空波长值	测量的波长值
1121	P(118)35-0	532.16803	532.1680
1120	R(105)34-0	532.17885	532.1780
1119	R(114)37-0	532.18381	532.1834
1118	P(82)33-0	532.18617	532.1867
1117	P(131)36-0	532.18740	532.1874
1116	P(52)32-0	532.19552	532.1954
1115	R(55)32-0	532.19845	532.1984
1114	R(85)33-0	532.20065	532.2005
1113	R(121)35-0	532.21852	532.2189
1112	P(142)37-0	532.22562	532.2256
1110	R(56)32-0	532.24515	532.2454

在对碘的多普勒吸收谱线的真空波长值理论计算同时, 也对特定的碘的吸收谱线的超精细谱线结构进行了计算和预测。表2列出了理论计算的 P(82) 33-0 跃迁的超精细结构分量间隔值。作为对计算值符合程度的考察, 将计算的 R(56)32-0 的超精细结构分量与国际推荐值进行了比较, 对于与相邻分量间隔较远的分量, 例如: a_1 , a_{10} 和 a_{15} 3 个分量, 计算值与测量值之间可符合到 0.02MHz, 而其他分量达到 0.1MHz 的量级。

采用基于 $3f$ 方法的激光稳频器,对多组碘分子吸收谱线的超精细结构作了探测。例如,将激光调谐到 532.186nm 附近时,可检测到一组 P(82) 33-0 的 15 个超精细分量,如图 3 所示。由图可见,由于碘的吸收系数非常大,碘室的温度还不够低,造成频率扫描时探测光信号有较大的变化,使得在多普勒吸收线中心附近光功率降低较多,出现中心附近信号较弱。为了与我们的理论计算值对比,图 4 给出了用根据理论计算值绘制的 P(82) 33-0 跃迁的超精细分量的相应图形。两者对比,分量之间的间距符合很好。这为在应用中采用理论计算值奠定了良好的基础。

表 2 理论计算的 P(82) 33-0 跃迁超精细结构分量间隔值(单位:MHz)

a_{15}	0.000
a_{14}	-122.164
a_{13}	-130.870
a_{12}	-155.771
a_{11}	-163.559
a_{10}	-286.116
a_9	-397.230
a_8	-412.371
a_7	-445.922
a_6	-461.089
a_5	-536.230
a_4	-567.425
a_3	-576.044
a_2	-607.703
a_1	-857.415

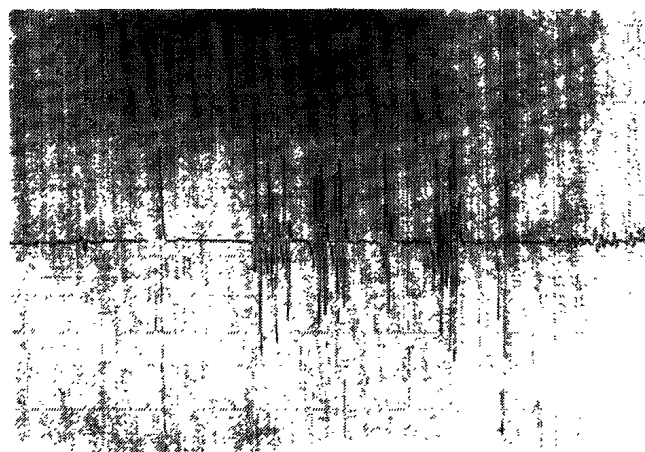


图 3 三次谐波方法探测的碘吸收谱线 P(82) 33-0@532.186nm

3 新的碘吸收谱线和激光频率稳定

在波长小于 532.245nm 的一个很宽的范围内, 532nm 波段有很丰富的碘吸收谱线。由表 1 可见, 用 Nd:YVO₄/KTP 激光器至少可探测到 10 条以上的谱线。其波长大致在 532.225nm ~ 532.168nm, 约在 0.05nm 范围内。在精密控制激光晶体 Nd:YVO₄ 和倍频晶体 KTP 的温度后,使其准确到或小于 0.01℃ 时,激光频率可以稳定在某一条碘吸收线的多普勒宽度以内,约在 500MHz 范围内。通过观测激光在碘室中产生的黄色荧光,就可以确认它在碘谱线多普勒宽度内,测量它的多普勒波长值和超精细谱线结构,与理论值进行分析对比,可以确认碘线属于的跃迁分支。初步实验已先后检测到 532.200nm 的 R(85)33-0, 532.198nm 的 R(55)32-0, 532.195nm 的 P(52)32-0, 532.186nm 的 P(82)33-0, 532.183nm 的 R(114)37-0 和 532.168nm 的 P(118)35-0 等 6 组吸收谱线的超精细结构^[6]。其中 532.195nm 和 532.186nm 两组谱线的分量均为 1,4,4,1,4,1 的组合结构,与国际推荐的 532.245nm R(56)32-0 谱线的结构完全相同,很适合选用它的 a_1 、 a_{10} 和 a_{15} 分量作为频率参考使用。

实验中,用 $3f$ 激光稳频器将 532nm Nd:YVO₄/KTP 激光的频率锁定到 P(82)33-0 的 a_1 分量上,图 5 给出了锁定状态下的相敏检波输出信号随时间的变化记录。我们曾使用这台稳频器将 633nm 腔内碘吸收的 He-Ne 激光器稳定在 R(127)11-5 谱线的超精细结构分量,经国际比对⁹,不同取样时间的频率稳定度在 $10^{-11} \sim 10^{-13}$ 量级,频率复现性可达 10^{-11} 量级。该稳频器并未对 532nm 波长的谱线探测和频率稳定进行整体优化。估计在对该稳频器、532nm 光强、光束直径和碘室温度等参数仔细优化后,有可能得到更好的谱线探测和频率稳定效果。

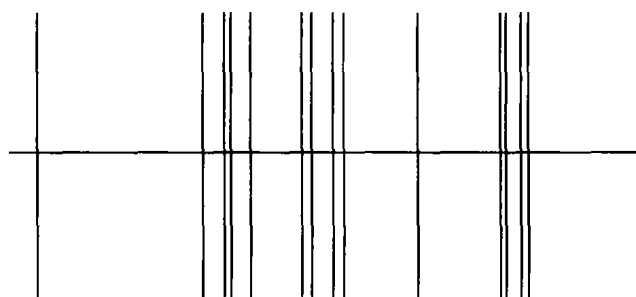


图 4 理论计算绘制的 P(82) 33-0 跃迁的谱线图形

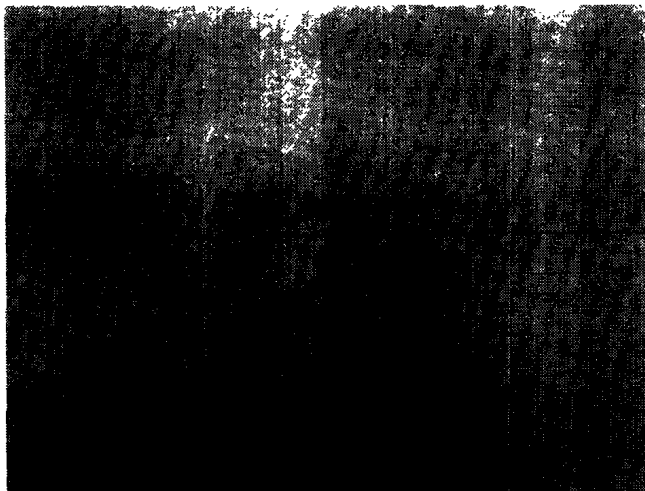


图5 锁定在碘吸收谱线 P(82)33-0 的 a_1 分量上的相敏检波输出

4 结论

采用 532nm Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频环形激光器, 获得了 10mW 以上的单频绿光输出功率, 检测到多组新的碘吸收谱线的超精细分量。在理论上计算了碘的多普勒吸收谱线波长和超精细谱线参数, 理论值与实验符合的较好。实现了激光频率在超精细结构分量上的激光频率稳定。

参考文献:

[1] Ady Arie and Robert L. Byer, "Laser heterodyne spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532nm", J. J. Opt. Soc. Am. B, 10, no. 11, 1990-1997, (1993)

[2] Feng-Lei Hong, Jun Ishikawa, "Hyperfine structures of the R(122)35-0 and P(84)33-0 transitions of 127I₂ near 532nm", J. Opt. Commun., 183, 101-108, (2000)

[3] Ady Arie, Stephan Schiller, Eric K. Gustafson, and Robert L. Byer, "Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine", J. Opt. Lett., 17, no. 17, 1204-1206, (1992)

[4] Ady Arie and Robert L. Byer, "Frequency stabilization of the 1064-nm Nd:YAG lasers to Doppler-broadened lines of iodine", J. Appl. Opt., 32, no. 36, 7382-7386, (1993)

[5] M. L. Eickhoff and J. L. Hall, "Optical frequency standard at 532nm", J. IEEE Trans. Instrum. Meas., 44, no. 2, 155-158, (1995)

[6] Naicheng Shen, Er Jun Zang, Hongjun Cao, et al., "Modulation transfer spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532 nm using a self-made diode-pumped Nd:YVO₄-KTP laser", IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 48, no. 2, (1999)

[7] T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the meter (1997)", Metrology, 36, 211, (1997)

[8] BIPM Report, Consultative Committee for Length (CCL), 10th Meeting, September, (2001)

[9] A. Lassila, K. Riski, J. Hu, T. Ahola, Shen Naicheng, Li Chengyang, P. Balling, J. Blabla, L. Abramova, Yu. G. Zakhareko, V. L. Fedorin, A. Chartier and J. M. Chartier, Metrology, 37, 701, (2000)

Investigation of Hyperfine Spectra of Iodine Molecule and Frequency Stabilization Using a Nd:YVO₄/KTP Ring Laser

ZANG Erjun, CAO Jianping, LI Chengyang, SHEN Naicheng
(Quantum Department, National Institute of Metrology, Beijing 100013)

PENG Yuexiang, ZUO Aibin, LI Ye
(Physics Dept., Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Absorption spectra and its hyperfine components from wavelength 532.170nm to 532.200nm were detected using a Nd:YVO₄/KTP ring laser. Theoretical calculation is given and it is in good agreement with the experiment result. Laser frequency was stabilized on some of the hyperfine components with third harmonic technique.

Key words: Solid-state lasers, ring lasers, laser frequency stabilization