

文章编号: 1001-3806(2009)06-0565-03

参考谱线法测量倍频 Nd:YAG 激光器调谐波长的研究

王 晟, 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 张立荣, 叶景峰, 叶锡生
(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 为了精确测量倍频 Nd:YAG 激光器的调谐波长, 采用碘分子在 532nm 附近的强吸收谱线作为频率稳定的绝对参考谱线, 建立了以碘蒸气为标定物的激光调谐波长测定系统, 实际测量了碘蒸气吸收谱线。通过谱线的特征结构与理论吸收谱线的比较, 得到了倍频 Nd:YAG 激光器调谐频率与外加偏压及电位计旋转角度的对应关系, 并确定了激光频率跳变点的位置, 最后给出了倍频 Nd:YAG 激光器的调谐范围。结果表明, 碘吸收谱线法可以用来精确测量倍频 Nd:YAG 激光器的调谐波长。

关键词: 光谱学; 调谐波长; 参考吸收谱线; 碘蒸气

中图分类号: TN247; O433.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.002

Measurement of tuning wavelength of frequency-doubled Nd:YAG laser by means of reference spectrum

WANG Sheng, LIU Jing-ru, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, ZHANG Li-rong, YE Jing-feng, YE Xi-sheng
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to measure the tuning wavelength of a frequency-doubled Nd:YAG laser, strong absorption lines of molecular iodine near 532nm was adopted to provide the absolute reference for frequency stabilization. The experiment system for measuring wavelength was built up with iodine vapor as reference, and the iodine vapor absorption lines were measured. Compared with the computed absorption lines, the relations between laser tuning frequency and voltage, laser tuning frequency and rotary angle of potentiometer were obtained, the mode hop was found, and the tuning range of frequency-doubled Nd:YAG laser was measured. The results show that it is a suitable method for measuring tuning wavelength of frequency-doubled Nd:YAG laser by means of iodine vapor absorption lines.

Key words: spectroscopy; tuning wavelength; reference absorption lines; iodine vapor

引 言

采用 Nd:YAG 晶体构成的单块固体环形激光器有着固有的优良的开环频率和功率稳定性、非常窄的线宽和精密频率调谐特性^[1-2]。Nd:YAG 激光器调谐波长的精确测量对于高分辨光谱方面的应用有着重要的意义。

常见的波长测定方法可分为两类: 一是将被测光与标准长度进行比较的绝对测量法, 如迈克耳孙干涉仪和法布里-珀罗干涉仪; 一是将被测光与另一已知波长进行比较的相对测定法, 如采用已知波长的参考光源, 或者各种窄谱线的辐射源等。Nd:YAG 激光的倍频光 532nm 波长附近与可作为自然参照点的碘分子的基态起始跃迁的强吸收谱线之间存在着相当好的吻合^[3,4], 这种吻合可以产生非常强且十分干净的超精细

谱线结构。这种超精细谱线结构可以作为光频标^[5,6]的绝对参考谱线。作者以已知碘分子理论吸收谱线为参考, 实际测量碘蒸气吸收谱线, 比较特征吸收线来实现对倍频 Nd:YAG 激光器调谐波长的测定。

1 测量原理

1.1 可调谐 Nd:YAG 激光器简介

可调谐 Nd:YAG 激光器由主激光器和种子激光器组成。Nd:YAG 激光器通过种子注入锁定可实现单纵模输出, 在 1064nm 时, 输出波长线宽为 0.003cm^{-1} 。经 2 倍频后 532nm 时, 激光线宽展宽 $\sqrt{2}$ 倍。

调谐是通过控制种子激光器的晶体温度来完成的, 具体可通过外加直流电压微调和自带电位计粗调来实现。在种子激光频率的调谐过程中, 有 2 种温度效应影响种子激光输出频率的输出, 一种是温度导致的晶体膨胀或收缩及晶体反射系数的变化, 1064nm 时引起激光频率产生约 $-3.1\text{GHz}/^\circ\text{C}$ 的变化; 另一种是温度引起晶体增益中心的移动, 1064nm 时引起激光频

作者简介: 王 晟 (1977-), 男, 工程师, 现主要从事激光应用方面的研究工作。

E-mail: pplunum1@163.com

收稿日期: 2008-10-25; 收到修改稿日期: 2008-11-04

率偏移约 $-1.4\text{GHz}/^\circ\text{C}$ 。在两种温度效应的综合影响下,种子激光输出频率随温度呈锯齿状变化,如图1所示。图中点1,3,5,7温度处的激光频率要跳变10GHz,分别降到点2,4,6,8对应频率处。

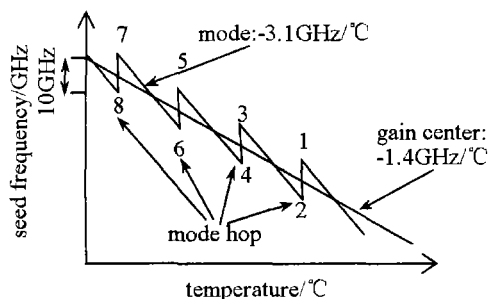


Fig. 1 Important points on seeder tuning curve

1.2 吸收谱线法测定激光频率原理

碘分子在 532nm 附近有丰富的强吸收谱线,可以作为频率稳定的绝对参考谱线。至于碘分子的物理特性,美国天体物理联合实验室的 HALL 等人曾经对以碘分子作为光频标中频率参考点的特征论述时指出^[7]:由于 $^{127}\text{I}_2$ 碘分子具有较大的质量,导致了它具有仅为 140m/s 的最可几热运动速率,相当于对应的 2 阶多普勒漂移仅为 1.1×10^{-13} ,与目前激光频标推荐波长中的不确定度最好的介质 OsO_4 的相应漂移相类似。意味着即使对于 $\pm 4.9\text{K}$ 的温度起伏,绿光对应的 2 阶多普勒漂移的变化也仅为 $\pm 1\text{Hz}$,而一般光学实验室的温度变化通常远低于这个温度起伏幅度。鉴于 532nm 碘分子频标在可见光波段极好的频率稳定性和复现性,国际计量局长度咨询委员会在 1997 年第 9 次会议上,在其推荐的谱线中,新增了 532nm 波长附近的 R(56)32-0 的 a_{10} 成分作为复现米定义的推荐谱线之一。

碘分子理论吸收谱线可以根据 FORKEY 模型^[8] 计算模拟,如图 2 所示,只要能够测量到这些吸收线,

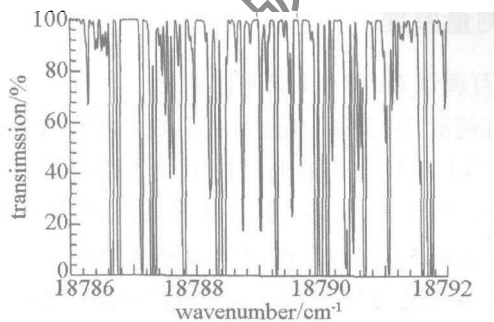


Fig. 2 Iodine absorption lines between 18786cm^{-1} and 18792cm^{-1}

根据谱线的特征结构与理论谱线进行比较就可以确定谱线对应的激光波长,进而得到激光波长的准确值。

2 实验系统

2.1 实验系统构成

倍频 Nd:YAG 激光器调谐波长测定系统见图 3。

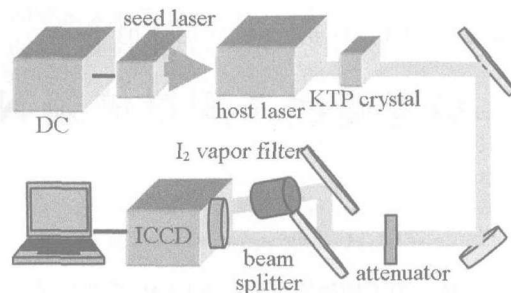


Fig. 3 Schematic of system for measuring frequency-doubled Nd:YAG laser tuning wavelength

它包括光源、碘蒸气过滤器和数据采集装置 3 部分。可调谐种子激光器产生窄线宽 1064nm 激光,注入到主激光器放大,经过 2 倍频晶体倍频为 532nm 绿光。为了避免激光能量太强,超出碘蒸气的吸收阈值和损坏像增强器(intensified charge coupled device, ICCD),光束通过衰减片进行了能量衰减。衰减后光束分成两束,一束直接成像到 ICCD,另一束经碘蒸气后再成像到 ICCD,由计算机采集和处理数据。通过给种子激光器外加偏压微调 and 旋转电位计粗调激光频率,测出每个频率点对应的碘蒸气的透过率,得到与外加偏压和电位计旋转角度有关的碘蒸气吸收谱线。与碘分子理论吸收谱线的特征结构比较,根据图 1 所示的激光频率调谐规律,分析得到倍频 Nd:YAG 激光器的输出频率与外加偏压、电位计旋转角度的关系,最后得到倍频 Nd:YAG 激光器的调谐范围。

2.2 碘蒸气过滤器

碘蒸气过滤器结构简图如图 4 所示,它由圆柱形

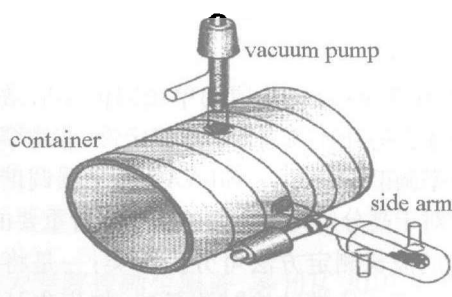


Fig. 4 Schematic of iodine filter cell

主容器、抽气系统和旁路部分组成。主容器为两端有着光学窗口的圆柱形玻璃容器, $\text{Ø}60\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。碘晶体放置于旁路中,通过加热升华进入主容器。主容器通过电加热带加热保持一定的温度,防止碘蒸气再次凝结。进入主容器的碘蒸气数密度与碘冷指温度和容器预抽真空度有关。实验时,碘冷指温度为 45°C ,容器预抽真空度为 5Pa 。

3 实验结果及分析

3.1 外加偏压与倍频激光频率对应关系

外加直流稳压电源时, Nd:YAG 激光器能在 $0\text{V} \sim$

10V 范围内微调激光频率。通过调节外加直流偏压, 测量得到与调节电压有关的吸收谱线, 如图 5 所示。

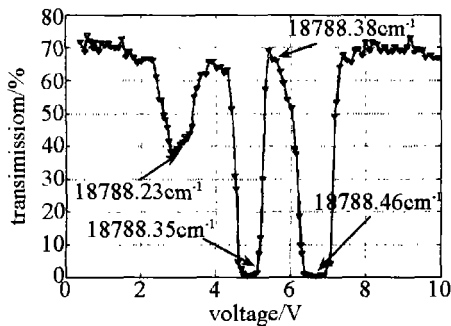


Fig. 5 Experimentally obtained absorption lines as a function of voltage

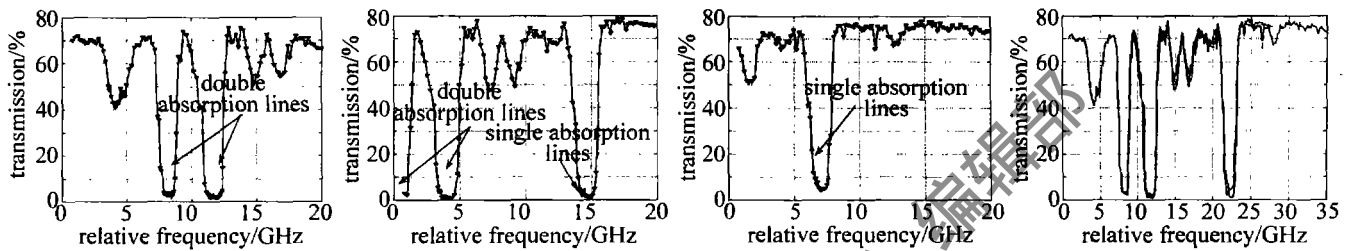


Fig. 6 Experimentally obtained absorption lines for various rotary angle of potentiometer
a—0° b—270° c—540° d—whole

图 6c 中的单吸收凹陷结构吻合, 通过计算它们的相对位置, 得到旋转角度与倍频激光频率的对应关系, 电位计每旋转 270°, 倍频激光频率偏移约 7.6GHz。

3.3 倍频激光频率跳变点确定

激光频率受温度的调节不是单调变化的, 如图 1 所示。在某个温度点, 激光频率会跳变到前面的频率, 然后又随温度单调变化。通过实际测量吸收谱线相同特征点的重复出现, 可以确定倍频激光频率跳变点的位置。

图 7 为存在倍频激光频率跳变点的碘蒸气吸收谱线测量图。从图上可以看出, 在相对频率 10GHz,

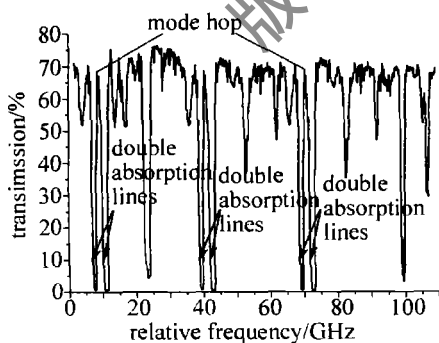


Fig. 7 Experimentally obtained absorption lines with mode hop

40GHz, 70GHz 处, 都有相同双吸收凹陷结构。根据激光频率调谐规律不难推断, 10GHz ~ 70GHz 范围内对应的激光频率是单调增加的, 当温度升高到 70GHz 对应的温度时, 激光频率发生跳变, 又跳回到 40GHz 处的激光频率, 则 10GHz 和 70GHz 处的激光频率为倍频激光频率跳变点。

图上双吸收凹陷结构与碘分子理论吸收谱线的波数 18788.4cm⁻¹ 处的谱线特征吻合。通过比较特征吸收凹陷的位置和宽度计算得到调节电压 1V, 倍频激光频率变化约 2GHz。

3.2 电位计旋转角度与倍频激光频率对应关系

激光器自带频率粗调电位计旋钮, 通过改变旋转角度实现激光频率大幅度的调节。实验测量了电位计在逆时针旋转 0°, 270° 和 540°, 分别在 0V ~ 10V 调节电压的碘分子吸收谱线, 如图 6 所示, 电压已转换成相应的相对频率。图 6a 中的双吸收凹陷结构与图 6b 中的双吸收凹陷结构吻合, 图 6b 中的单吸收凹陷结构与

3.4 调谐范围的确定

消除倍频激光频率跳变点, 将频率重复的谱线重合, 得到随频率单调增加的碘分子吸收谱线, 如图 8 所示。与碘分子理论吸收谱线比较, 此谱线与波数在

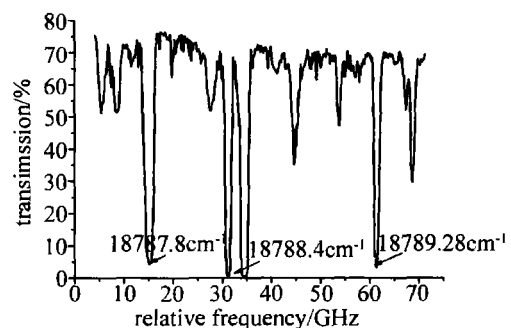


Fig. 8 Experimentally obtained absorption lines between 18787.6cm⁻¹ and 18789.4cm⁻¹

18787.5cm⁻¹ ~ 18789.6cm⁻¹ 的谱线相吻合, 由此计算得到了倍频 Nd:YAG 激光器的调谐范围为 563625GHz ~ 563688GHz, 带宽约为 63GHz, 转换为波长范围为 532.2093nm ~ 532.2688nm。

4 结 论

鉴于 532nm 碘分子频标在可见光波段极好的频率稳定性和复现性, 以其理论吸收谱线为参考, 通过调谐倍频 Nd:YAG 激光器输出波长测量了其实际的吸收谱线。通过分析得到了倍频激光频率与外加偏压及电位计旋转角度的对应关系, 确定了倍频激光频率跳变

(下转第 578 页)

Table 1 The offset data measured on the 100m standard rail

distance/m	100.012	95.121	90.115	80.125	70.142	60.132
horizontal offset/mm	0.115	0.231	0.169	0.120	0.245	0.312
vertical offset/mm	0.158	0.147	0.012	0.014	0.185	0.017
distance/m	50.189	40.147	30.158	20.147	10.155	5.102
horizontal offset/mm	0.187	0.362	0.188	0.214	0.255	0.147
vertical offset/mm	0.114	0.238	0.163	0.144	0.175	0.014

少人为带来的误差。

4 结束语

提出了一种全新的解决铁轨直线度检测的测量系统,该系统主要由嵌入式采集、处理模块、激光测距模块和无线通讯模块构成,其与图像处理 and 自准直算法相配合,能够保证系统对轨道的检测精度达到0.3mm,可以在一定程度上代替传统的轨道测量方法,使得测量过程更加简便、精确。

(上接第567页)

点的位置。通过消除激光频率跳变的影响,得到了倍频Nd:YAG激光器的调谐范围为563625GHz~563688GHz,转换为波长范围为532.2093nm~532.2688nm。结果表明,碘吸收谱线法可以作为测量倍频Nd:YAG激光器调谐波长的一种有效方法。

参考文献

- [1] ZANG E J, CAO J P, ZHONG M Ch, *et al.* Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 33-340 (in Chinese).
- [2] KANE T J, BYER R L. Monolithic unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt Lett*, 1985, 10(2): 65-67.
- [3] ARIE A, BYER R. Laser heterodyne spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532nm [J]. *J O S A*, 1993, B10(11): 1990-1997.

参考文献

- [1] SI Q, CAI H Y, HUANG Z H, *et al.* Design of a real-time acquisition system of CMOS image based on USB2.0 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(4): 117-119 (in Chinese).
- [2] LU Z Q. C/C++ image processing program [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 184-221 (in Chinese).
- [3] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [4] HAN S Q, WANG L. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 91-94 (in Chinese).
- [5] ZHANG X H, YANG K T. An improved 2-D hough transform method for extracting laser spot parameter [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 995-997 (in Chinese).
- [6] WANG H F, WANG D B, LIU S Q. Research on auto identify and measurement approach of laser target image [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(6): 564-566 (in Chinese).
- [7] ZHONG Z L, ZHOU B, HE Y Q, *et al.* Laser spot location in imaging laser detecting systems [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 248-251 (in Chinese).
- [8] SUN A X, WANG J, HE H X, *et al.* Testing precision analysis of centrobaric of laser facula [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 667-679 (in Chinese).
- [9] YANG J X, ZHUANG Y F, SHEN W X, *et al.* Precise measurement of the effective area of laser spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(10): 1263-1266 (in Chinese).
- [4] HONG F L, ISHIKAWA J. Hyperfine structures of the R(122)35-0 and p(84)33-0 transitions of $^{127}\text{I}_2$ near 532nm [J]. *J Opt Commun*, 2000, 183(1/4): 101-108.
- [5] LI J, BAI X D. The parameters optimization of Doppler broadened iodine at 532nm Nd:YVO₄ laser frequency stabilization [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 50-52 (in Chinese).
- [6] ZANG E J, CAO J P, LI Y, *et al.* 532nm iodine molecular optical frequency standards [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, 34(2): 203-208 (in Chinese).
- [7] HALL J L, MA L S, TAUBMAN M, *et al.* Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd:YAG laser [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(2): 583-586.
- [8] FORKEY J N, LEMPERS W R, MILES R B, *et al.* Corrected and calibrated I₂ absorption model at frequency-doubled Nd:YAG laser wavelengths [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(27): 6729-6738.