

# 100 GHz 光谱扫描测量碱金属蒸气激光器 增益介质浓度

阙义钦 王红岩 杨子宁 华卫红 许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)具有量子效率高、气体介质循环流动散热、全电操作、结构紧凑等特点,是极具发展潜力的新型高能激光光源。其中,增益介质内碱金属原子浓度测量是对 DPAL 进行诊断测试的重要研究内容。通过利用单频分布布拉格反射(DBR)激光器波长扫描测量铷蒸气的吸收光谱,采用对激光器进行温度调节与电流扫描相结合的方法进行扫描光谱范围拼接,利用无跳模调谐范围为 23 GHz 的激光器实现了 100 GHz 的无跳模光谱扫描范围,在此基础上测量了充入大气压量级缓冲气体铷蒸气的完整吸收光谱。通过与理论计算结果进行参数拟合得到了铷原子浓度。该方法可应用于高功率抽运条件下流动介质 DPAL 中碱金属原子浓度的测量。

**关键词** 激光器; 碱金属蒸气激光器; 原子浓度; 吸收谱; 超精细结构; DBR 激光器

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0515001

## Measurement of Alkali Concentration in Diode Pumped Alkali Vapor Lasers by 100 GHz Spectral Scanning

Que Yiqin Wang Hongyan Yang Zining Hua Weihong Xu Xiaojun

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Diode-pumped alkali vapor laser (DPAL) has great potential in high power scaling due to its high quantum efficiencies, convenient thermal management by flowing the gaseous medium, all-electric operation, light weight and compact configuration, etc. The measurement of alkali concentration inside the gain medium is necessary and important to analyze the laser performance. By scanning the wavelength of the single-frequency distributed Bragg reflector (DBR) laser, the absorption spectrum of rubidium vapor is measured. By using the spectral matching method which is realized by integrated adjustment of the DBR's driven current and operation temperature, the mode-hop free tuning range of DBR laser is extended from 23 GHz to 100 GHz. And the full absorption spectrum of rubidium D1 line is well scanned with buffer gas at an atmospheric pressure. By compared with the theoretical result, the concentration of alkali atom is obtained. This method can be applied for the measurement of alkali concentration under conditions of high power pumping with a flowing medium.

**Key words** lasers; alkali vapor laser; atomic concentration; absorption spectrum; hyperfine structure; DBR laser

**OCIS codes** 140.1340; 140.5960; 300.6210

## 1 引 言

半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)具有量子效率高、气体介质可循环流动散热、全电操作、结

构紧凑等特点<sup>[1]</sup>,是未来极具发展潜力的新型高能激光光源,近年来已得到广泛地关注和大力发展<sup>[2-4]</sup>。2012年,俄罗斯已实现 1 kW 连续输出铷

收稿日期: 2013-09-22; 收到修改稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11272343)

作者简介: 阙义钦(1989—),男,硕士研究生,主要从事碱金属激光检测方面的研究。E-mail: queyiqin@sina.com

导师简介: 华卫红(1968—),女,博士,教授,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: rosehua@hotmail.com

DPAL,光-光转换效率接近 50%<sup>[5]</sup>。碱金属原子浓度对 DPAL 的性能具有重要影响,是激光器设计及诊断测试的重要参量。目前,对于静态 DPAL 增益介质,一般通过测温计算饱和蒸气压推算碱金属原子浓度;但在高功率抽运以及流动介质条件下,由于热量沉积以及气动效应等的影响将导致碱金属原子浓度的非均匀分布<sup>[6-7]</sup>,此时无法应用饱和蒸气压计算原子浓度。因此,对于流动介质条件下高功率 DPAL 碱金属原子浓度测量具有重要研究价值。

基于可调谐半导体激光器的吸收光谱测量技术近年来随着半导体激光器的发展而迅速发展<sup>[8-9]</sup>,通过吸收光谱的测量也可以实现对碱金属原子浓度的精确测量。首先利用探针光波长扫描来测量 D<sub>1</sub> 或者 D<sub>2</sub> 线的吸收谱线,同时与理论计算得到不同原子浓度下的吸收谱线进行对比,从而得到碱金属原子浓度<sup>[10]</sup>。2008 年,Charles 等<sup>[11]</sup>进行了深入的理论分析,并应用扫描范围为 10 GHz 的激光器测量得到 40 °C 铷 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 线的吸收谱线。2012 年,Kristin 等<sup>[12]</sup>应用扫描范围为 60 GHz 的探针激光测量了 70 °C 铯蒸气的吸收谱。2010 年,Matthew 等<sup>[13]</sup>通过使用调谐范围为 75 GHz 的激光器,设置单步测量间隔为 300 MHz,对充有缓冲气体的铷蒸气吸收谱的尾翼进行测量,并根据尾翼的吸收线,通过 Voigt 线型拟合得到了充有缓冲气体的铷蒸气吸收谱,最后与理论计算的吸收谱线对比得到温度低于 85 °C 的介质原子浓度。但是在 DPAL 应用中,为增加对抽运光的吸收,蒸气池通常充有缓冲气体来加宽吸收谱,同时增益介质的温度一般在 100 °C 以上。因此要得到较高温度的完整吸收谱,需要在 100 GHz 范围内进行吸收谱扫描,进而得到较为准确的碱金属原子浓度。

以铷蒸气激光器为例,首先计算了 D<sub>1</sub> 线的超精细结构跃迁的 Voigt 线型<sup>[14]</sup>计算了不同原子浓度纯铷蒸气和充有缓冲气体的铷蒸气的吸收曲线。使用扫描范围为 23 GHz 的分布布拉格反射(DBR)激光器,采用先分段扫描再光谱拼接的方案,实现了 100 GHz 的吸收光谱扫描。在此基础上得到了铷蒸气的 Voigt 线型测量,并通过实测吸收谱线与不同碱金属原子浓度下的理论吸收谱进行对比拟合,得到增益介质内铷原子浓度。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。由 Photodigm 公司生产的 DBR 激光器线宽为 1 MHz,无跳模调谐范围为 23 GHz。通过透镜 F 对输出光束进行准直。由棱镜整形系统将激光在慢轴方向进行扩束,在快轴方向保持不变来使激光的光斑变成近似圆形。光隔离器使光束单向通过,防止器件表面的反射光进入 DBR 激光器,影响激光器的稳定工作。采用扩束器进行扩束,使光强降低至 1 mW/cm<sup>2</sup> 以下,从而满足小信号条件能够应用比尔定律计算激光吸收比例。

为进行精确测量,将探针光分成 3 路,分别由 3 个 Si 光电探测器进行光强探测,如图中的 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>。第一路直接进行光强探测来消除光强波动对测量造成的影响;第二路通过长度为 20 mm 充有纯铷的蒸气池,以铷蒸气的吸收谱对探针激光进行波长标定;第三路为测量光束,通过长度为 5 mm、充有 3.333×10<sup>4</sup> Pa 乙烷及 3.333×10<sup>4</sup> Pa 氮气的铷蒸气池。在测量过程中,只改变激光器的波长,不改变激光器通过蒸气池的位置,确保测量的粒子数密度只受蒸气池的温度影响。

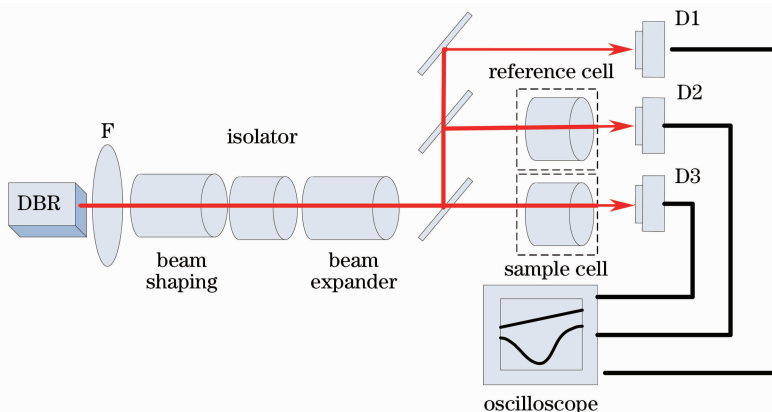


图 1 吸收光谱法测量原子浓度的实验图

Fig. 1 Experimental diagram of alkali atomic concentration measurement by laser-absorption spectroscopy

### 3 实验结果

#### 3.1 理论计算碱金属原子吸收光谱

首先计算铷原子吸收截面,将  $\text{Rb}^{85}$  和  $\text{Rb}^{87}$   $D_1$  线内每一条允许的超精细结构跃迁的 Voigt 线型,根据同位素丰度和谱线跃迁强度进行叠加,再根据总的吸收截面计算吸收光谱。其数学表达式为

$$\sigma(\nu) = \sum_{F'', \text{iso}} \left( \frac{g_{F'}}{g_{F''}} \right) \left( \frac{\lambda^2}{8\pi} \right) (A_{21} S_{F''F'}) g_{F'' \rightarrow F'}(\nu) f_{F''} f_{\text{iso}}, \quad (1)$$

式中  $\sigma(\nu)$  表示超精细结构  $F'' \rightarrow F'$  的跃迁截面线型分布;  $F''$  和  $F'$  分别代表  $5^2S_{1/2}$  和  $5^2P_{1/2}$  能级内超精细结构对应的量子数。对于  $\text{Rb}^{85}$ ,  $F''=2, 3, F'=2, 3$ ; 对于  $\text{Rb}^{87}$ ,  $F''=1, 2, F'=1, 2$ , 均对应 4 条超精细结构跃迁;  $g_j = 2J + 1$  表示精细结构的简并度因子;  $g_{F'}\lambda$  为中心波长;  $A_{21}$  为  $5^2P_{1/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$  的自发辐射速率;  $f_{\text{iso}}$  表示同位素丰度 ( $\text{Rb}^{85}$  72.2%,  $\text{Rb}^{87}$  27.8%);  $S_{F''F'}$  为超精细结构跃迁的相对强度因子,其值如表 1 所示。

表 1 超精细结构跃迁相对强度因子  $S_{F''F'}$

Table 1 Hyperfine transition line strength factor  $S_{F''F'}$

$\text{Rb}^{85}$			$\text{Rb}^{87}$		
$F$	2	3	$F$	1	2
2	2/9	5/9	1	1/6	1/2
3	7/9	4/9	2	5/6	1/2

$f_{F''}$  表示  $5^2S_{1/2}$  能级内粒子数在超精细能级  $F''$  上的统计分布,表示为

$$f_{F''} = \frac{(2F'' + 1) \exp[-E(F'')/kT]}{\sum_{F''} (2F'' + 1) \exp[-E(F'')/kT]}, \quad (2)$$

$f_{F'' \rightarrow F'}$  表示超精细结构  $F'' \rightarrow F'$  跃迁的 Voigt 线型,其数学表示为

$$g_{F'' \rightarrow F'}(\nu) = \left( \frac{M}{2\pi kT} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} g_L(\nu) \exp\left( \frac{-Mv_z^2}{2kT} \right) dv_z, \quad (3)$$

$$g_L(\nu) = \frac{\Delta\nu_L / (2\pi)}{(\Delta\nu_L / 2)^2 + \{ \nu - [ \nu_{F''F'} + \nu_{F''F'}(v_z/c) + \Delta\delta ] \}^2}, \quad (4)$$

式中  $M$  为铷原子质量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $g_L(\nu)$  为原子的洛伦兹线型部分,  $v_z$  为原子在光传播方向上的速度分量,  $\Delta\nu_L$  为子线宽和频移,  $c$  为光速,  $\nu_{F''F'}$  为超精细结构  $F'' \rightarrow F'$  间的跃迁频率,  $\Delta\delta$  为中心频移。利用上述公式,首先计算了纯铷蒸气池在 80 °C 时的  $D_1$  线吸收截面,如图 2 所示。

其中横坐标是相对精细结构  $5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$  跃迁

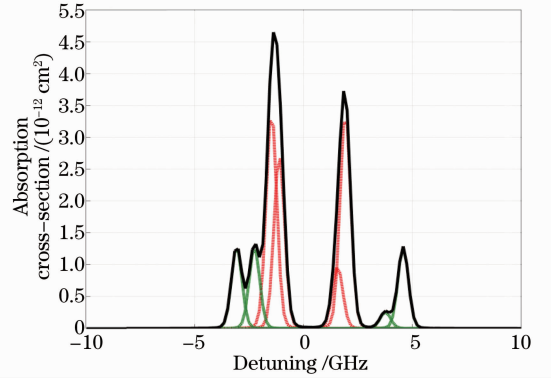


图 2 80 °C 时 Rb 原子  $D_1$  线吸收截面线型  
Fig. 2 Absorption cross-section line-shape of Rb  $D_1$  line at 80 °C

频率的偏移,纵坐标为吸收截面值;点划线和虚细线(各 4 条)分别表示  $\text{Rb}^{85}$  和  $\text{Rb}^{87}$  两种同位素的超精细结构跃迁截面线型,实线表示总的吸收截面。

比尔定律:

$$\ln \left[ \frac{I(\nu)}{I_0} \right] = \Delta N \sigma(\nu) L, \quad (5)$$

式中  $I(\nu)$  和  $I_0$  分别为透过吸收介质的光强和初始光强,  $\sigma(\nu)$  为能级跃迁的吸收截面,  $L$  为吸收介质的长度,  $\Delta N$  为能级间的粒子数差。当光强度远小于饱和光强时,探针光对不同能级粒子分布的影响可以忽略。此时吸收介质均处于基能态,  $\Delta N$  可近似为原子浓度  $N$ 。

在此基础上,根据(1)式,可以计算得到铷蒸气池的透射率曲线。

图 3(a)和(b)分别为在不同原子浓度下,纯铷蒸气池和充有  $3.333 \times 10^4$  Pa 乙烷及  $3.333 \times 10^4$  Pa 氮气的铷蒸气池的透射率曲线。

#### 3.2 对比计算碱金属原子浓度

测量时,通过扫描驱动电流来实现激光器中心波长的扫描。控制电流扫描幅度使激光的中心频率扫描范围为 20 GHz。图 4(a)为 70 °C 时测量得到的长度为 20 mm 纯铷蒸气池的光谱率曲线与理论计算的对比,根据测量曲线与计算曲线的对比,可以有效验证测量的准确性,同时准确地标定探针激光波长。

充有缓冲气体的铷蒸气,其吸收线宽得到较大的加宽,20 GHz 的扫描范围已经不能满足实验要求,此时可以通过调节激光器的温度来改变激光的中心波长(27 GHz/°C)。通过计算可设定 5 组不同的温度,使激光器在这 5 组温度下分别进行 20 GHz 范围光谱扫描,将得到的 5 组吸收谱线前后对接,从而得到 100 GHz 的吸收谱线。采用光谱拼接方案需要选择合适的温度点以避免分段拼接时出现跳模现

象,同时需要消除各分段扫描光谱两端因电流突变而产生的畸变。图 4(b)为 120 °C 时,测量得到长度为

5 mm 充有  $3.333 \times 10^4$  Pa 氦气和  $3.333 \times 10^4$  Pa 乙烷的铷蒸气池的吸收光谱与理论计算的对比。

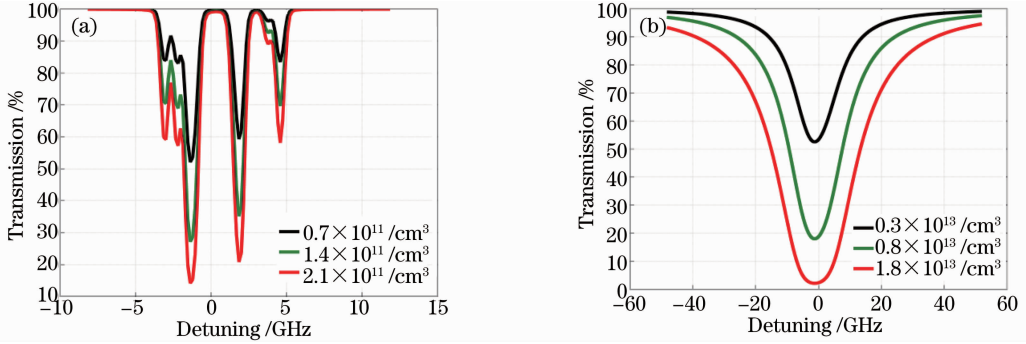


图 3 不同原子浓度铷蒸气池的透射率曲线。(a) 纯铷蒸气;(b) 充  $3.333 \times 10^4$  Pa 乙烷和  $3.333 \times 10^4$  Pa 氦气的铷蒸气  
Fig. 3 Transmittance curve of rubidium vapor cell in different atomic concentrations. (a) Rubidium vapor;  
(b) rubidium vapor with  $3.333 \times 10^4$  Pa ethane and  $3.333 \times 10^4$  Pa helium

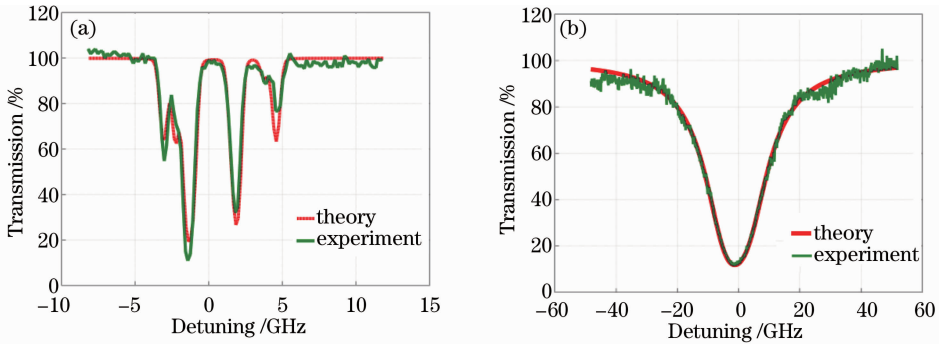


图 4 实测蒸气吸收光谱曲线与计算曲线对比。(a) 纯铷蒸气;(b) 充  $3.333 \times 10^4$  Pa 乙烷和  $3.333 \times 10^4$  Pa 氦气的铷蒸气  
Fig. 4 Contrast of vapor absorption spectra measured and calculated curve. (a) Rubidium vapor;  
(b) rubidium vapor with  $3.333 \times 10^4$  Pa ethane and  $3.333 \times 10^4$  Pa helium

从图 4 可以看出,纯铷蒸气池的吸收谱主要表现为 4 个峰,各个吸收峰的带宽均为 500 MHz 左右(多普勒加宽)。添加缓冲气体后,在多普勒加宽和洛仑兹加宽的共同作用下,吸收光谱加宽导致 4 个峰合并成一个峰,且带宽加宽至约 17 GHz。因此,计算充有缓冲气体的吸收光谱时,采用介于多普勒线型和洛仑兹线型的 Voigt 线型。

得到的吸收光谱曲线对比拟合来得到介质浓度。这里采用了一种较为简便的方法:计算不同浓度的透射率曲线与实测曲线的均方根误差,并取最小值所对应的浓度作为实验测量的介质浓度。根据这种方法得到不同温度下的增益介质原子浓度。同时用饱和和蒸气压公式计算了该温度下的原子浓度,并计算了相应的测量误差,如图 5 所示。

通过计算不同浓度介质的吸收光谱,并与实测

作为经验公式,在不同的应用中饱和蒸气压  $P$

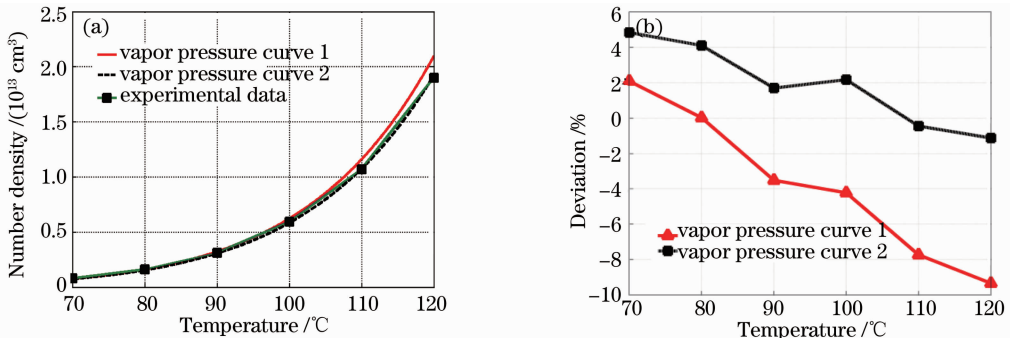


图 5 (a)测量结果与饱和蒸气压计算结果对比图和(b)偏差图

Fig. 5 (a) Contrast and (b) deviation chart of measurement results and calculated saturated vapor pressure results

公式有不同形式。其中,最常使用以下两个公式进行计算:

$$\lg P = 7.193 - \frac{4040}{T}, \quad (6)$$

$$\lg P = 6.976 - \frac{3969.48}{T}, \quad (7)$$

式中  $T$  为蒸气的温度。图 5 中给出了(1)式和(2)式的计算结果与实测结果的对比。由图 5 可知,测量得到的碱金属原子浓度与饱和蒸气压计算结果比较接近,最大偏差在 10% 以内。在较低温度下( $T < 100\text{ }^\circ\text{C}$ ),误差均在 5% 以内,这与 Matthew 等<sup>[13]</sup>的测量结论相一致。测量误差主要是由温度测量误差引起的。实验中采用单点测量铷蒸气池壁的温度,并用这个温度来代替铷蒸气的温度。另一方面,探针激光功率较低,微小的噪声也对实验测量造成一定的误差。

吸收光谱法在测量增益介质原子浓度时存在较小误差,但在实际中具有重要应用价值。一方面,当 DPAL 处在高强度抽运时,增益介质内部有很高的热量沉积,并呈现出明显的温度梯度<sup>[16]</sup>。另一方面,当 DPAL 采用循环流动结构时,增益介质原子浓度将不能用饱和蒸气压计算。在这两种情况下,吸收光谱法测量原子浓度都是可行的。

## 4 结 论

利用单频 DBR 半导体激光器,提出光谱拼接方案,在激光器无跳模调谐范围 23 GHz 条件下实现了 100 GHz 范围内的吸收光谱扫描,根据实测透射率曲线的拟合,对添加大气压量级缓冲气体条件下 DPAL 增益介质碱金属原子浓度进行了测量,并与理论计算结果进行了对比分析。该测量方法可以应用于高功率抽运条件下流动介质 DPAL 碱金属原子浓度的测量。

## 参 考 文 献

1 J Zweiback, A Komashko. High-energy transversely pumped

- alkali vapor laser[C]. SPIE, 2011, 7915: 791509.
- 2 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng *et al.*. Theoretical model and novel numerical approach of a broadband optically pumped three-level alkali vapour laser[J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2011, 44(8): 085401.
- 3 W F Krupke, F William. Diode pumped alkali lasers (DPALs)—A review(rev1)[J]. Quantum Electron, 2011, 1(9): 1–25.
- 4 Xu Cheng, Tan Rongqing, Li Zhiyong, *et al.*. 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping[J]. Chinese J lasers, 2013, 40(1): 0102009.  
徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102009.
- 5 A V Bogachev, S G Garanin, G T Mikaelian. Diode pumped caesium vapour laser with closed cycle laser active medium circulation[J]. Quantum Electron, 2012, 2(42): 95–98.
- 6 M A Brossel, J Brossel. Relaxation of optically pumped Rb atoms on paraffin-coated walls[J]. Phys Rev A, 1966, 147(1): 41.
- 7 X Zeng, Z Wu, T Coll, *et al.*. Experimental determination of the rate constants for spin exchange between optically pumped K, Rb, and Cs Atoms and <sup>129</sup>Xe nuclei in alkali metal noble gas van der waals molecules[J]. Phys Rev A, 1985, 31(1): 260.
- 8 Chen Jiuying, Liu Jianguo, He Yabai, *et al.*. Scanning frequency optimization of laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0230003.  
陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 激光吸收光谱技术中扫描频率的选择[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0230003.
- 9 Gao Nan, Du Zhenhui, Qi Rubin, *et al.*. Data preprocessing of broad-spectrum tunable-diode-laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0430004.  
高楠, 杜振辉, 齐汝宾, 等. 宽谱调谐二极管激光吸收光谱的数据预处理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0430004.
- 10 D A Steck. Rubidium 85 D Line Data[Z]. Oregon Center for Optics and Department of Physics. University of Oregon, 2001.
- 11 S Paul, S Charles, C Adams. Absolute absorption on rubidium D lines: comparison between theory and experiment[J]. J Phys B, 2008, 155004(41): 1–10.
- 12 K L Galbally-Kinney, D L Meser, W J Kessler. Measurements and imaging of optical gain in optically pumped alkali-rare gas systems[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(4): 041110.
- 13 D R Matthew, F W Charles, L P Martiqua. Measurement of rubidium number density under optically thick conditions[C]. 41st Plasmadynamics and Lasers Conference. Chicago Illinois, AIAA 2010. 4881.
- 14 G A Pitz, G P Perram. Pressure broadening of the D1 and D2 lines in diode pumped alkali lasers[C]. SPIE, 2008, 7005: 700526.
- 15 C B Alcock, V P Itkin. Vapor pressure of the metallic elements [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1984, (23): 309–313.
- 16 H Weihong, Y Zining, W Hongyan. The 3D numerical simulation of waste heat inside the end-pumped DPAL[C]. SPIE, 2012, 8677: 86770K.

栏目编辑: 宋梅梅