

## 薄铷汽室饱和吸收光谱的研究

荆彦锋<sup>1,2</sup>, 闫树斌<sup>1</sup>, 秦丽<sup>1</sup>, 任小红<sup>1</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 长治医学院, 山西 长治 046000)

**摘要:** 高性能的频率基准在民用、军事领域得到广泛应用。饱和吸收光谱技术是减小多普勒加宽, 获得高性能原子钟的有效手段。本文介绍了原子汽室饱和吸收研究的实验装置和实验结果, 发现原子汽室必须在适当温度下才能获得明显的饱和吸收光谱。对 300  $\mu\text{m}$  厚度的铷汽室, 50  $^{\circ}\text{C}$  时其饱和吸收的相对强度最高, 交叉共振峰的相对强度比 50 mm 厚铷汽室明显减小, 分析并解释了减小的原因。实验结论对微型高性能原子钟的研究具有参考价值。

**关键词:** 饱和吸收光谱; 薄铷汽室; 交叉共振峰

**中图分类号:** O436 **文献标识码:** A

## Research of thin Rb vapor cell's saturated absorption spectroscopy

JING Yan-feng<sup>1,2</sup>, YAN Shu-bin<sup>1</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, REN Xiao-hong<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Changzhi Medical College, Changzhi 046000, China)

**Abstract:** Frequency standard is a key device in many civil and military applications. Saturated absorption can minimize the Doppler expansion and lead to high performance frequency standard. An experimental equipment to study the saturated absorption in Rb vapor cell is described in this paper. Experiment result shows that saturated absorption has an optimal temperature under which biggest absorption occurs. For a 300  $\mu\text{m}$  vapor cell, 50  $^{\circ}\text{C}$  temperature is appropriate. Experiment also shows that the relative intensity of crossover resonance of the 300  $\mu\text{m}$  cell is smaller than the 50 mm cell. Analysis and explanation about the phenomenon is made. The experiment and the conclusion is of reference value for the research of atom clock.

**Key words:** saturated absorption spectroscopy; thin Rb vapor cell; crossover resonance

### 1 引言

饱和吸收光谱技术是一种在原子汽室中直接获得消除多普勒加宽的简便有效地图像激光光谱方法, 它是一种高分辨率光谱, 广泛应用于激光频率标准<sup>[1]</sup>、激光冷却<sup>[2]</sup>等方面。这种技术最早是在 20 世纪 70 年代由 T. W. Hansh 研究小组在研究碱金属原子 D2 线的吸收光谱时提出并实现的<sup>[3]</sup>。饱和吸收光谱技术有效地消除了多普勒增宽对谱线的影响, 实现了对亚多普勒线宽的原子、分子气体样品的吸收谱线的探测。现代通讯技术和高精度定位的发展, 势必要求频标仪器具备更高的频率稳定性, 更低的功耗, 更小的体积, 相应的作为其物理部分主体的

原子汽室也必须变薄变小。随着原子汽室的变薄, 汽室内原子数的减少以及原子与汽壁碰撞之前和激光束作用的时间变短, 会使光谱发生变化, 本文研究薄汽室饱和吸收光谱的特点。

### 2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 光源采用可调谐外腔式

**基金项目:** 国家“973”前期预研项目 (No. 2007CB316504); 国家重点实验室基金 (No. 9140c1204040808); 山西省重点实验室开放基金 (No. 200703018) 资助。

**作者简介:** 荆彦锋 (1974 - ), 男, 硕士, 讲师, 主要从事原子物理及 CPT 原子钟的研究。E-mail: jing\_yf@126.com

**收稿日期:** 2010-02-10

半导体激光器 TLB-6312H(美国 NEW FOCUS),它在 780 nm 处最大可输出功率为 24 mW,粗调光栅反馈的角度最大可达 5 nm 的调谐范围,自由运行时的线宽小于 300 kHz,并能把波长调谐到铷原子的 D2 跃迁上。激光输出首先经过光隔离器防止光反馈影响激光器的模式,然后经  $\lambda/2$  波片和偏振分束器(PBS)调节出射光的强度和偏振状态,再通过分束器(BS)分为两束光,光束 B1 输出大部分的光用于 CPT 原子钟的实验,光束 B2 用于 Rb 原子的饱和吸收光谱。光束 B2 又被一个厚为 12 mm 未镀膜的 K9 玻璃基片分为三束,基片表面反射率约为 4%,光束 1 为检测光,光束 2 为参考光,光束 1 和光束 2 经衰减器调节进入铷泡,通过一半透半反镜后由快速光电二极管(OPT101)探测,最后由四通道数字示波器显示和存储,光束 3 作为泵浦光进入铷泡与光束 1 空间重合,但传播方向相反。实验中函数发生器(FG)给激光器提供频率为 20 Hz 的三角波扫频信号,激光器的电流为 76.8 mA,泵浦光的功率为 70  $\mu$ W,探测光的功率为 7.5  $\mu$ W,铷汽室为我们加工的薄泡,两内壁间隔约为 300  $\mu$ m,如图 2 所示。

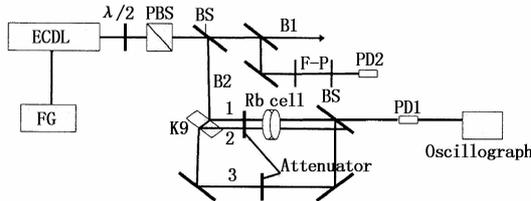


图1 实验装置图

Fig. 1 experimental setup

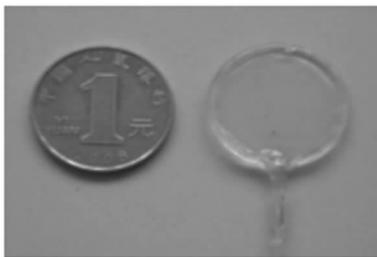


图2 薄铷汽室照片

Fig. 2 the photoshop of thin Rb vapor cell

### 3 实验结果和分析

实验过程中通过温控仪把铷汽室的温度调到不同的值,结果发现薄铷汽室的饱和吸收谱线随温度的变化特别明显:常温时,由于薄汽室里的原子密度小,和激光束作用的原子数较少,饱和吸收信号不明显,几乎就看不出,随着温度的升高,原子汽的密度增加,粒子的热运动加剧,谱线强度逐渐增加,在 50  $^{\circ}$ C 时信号最强,饱和吸收最明显,随后再升高泡温,信号趋于饱和,饱和吸收谱线逐渐减弱,在 70  $^{\circ}$ C

时饱和吸收消失,四个多普勒展宽的四个包络变成了三个包络。图 3 为在相同的光学条件下铷汽室温度取不同值时的饱和吸收光谱,其中图 3(a)为 20  $^{\circ}$ C 时的饱和吸收谱线,图 3(b)为 30  $^{\circ}$ C 时的饱和吸收谱线,图 3(c)为 50  $^{\circ}$ C 时的饱和吸收谱线,图 3(d)为 70  $^{\circ}$ C 的饱和吸收谱线。

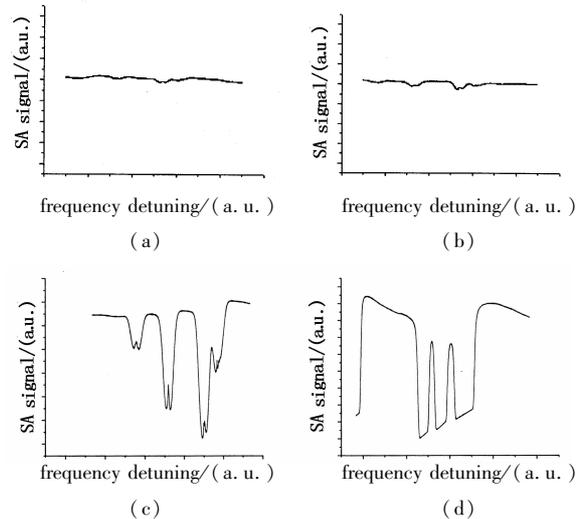
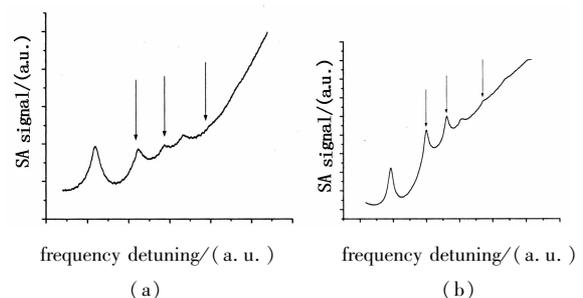


图3 不同温度时的饱和吸收谱线

Fig. 3 saturated absorption spectroscopy of thin Rb vapor cell with different temperature

通过对比 50  $^{\circ}$ C 时 300  $\mu$ m 薄铷汽室和 50 mm 汽室的饱和吸收谱线,可以发现交叉共振峰的幅度明显减小,而标准原子跃迁谱线强度几乎没什么变化,图 4 为两个铷汽室的  $^{87}$ RbD2 线的  $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$  的饱和吸收谱线,其中图 4(a)为 300  $\mu$ m 薄铷汽室的饱和吸收谱线,图 4(b)为 50 mm 铷汽室的饱和吸收谱线,图中箭头所指为交叉峰。

图4 50 $^{\circ}$ C 时不同厚度铷汽室的  $^{87}$ RbD2 线的  $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$  的饱和吸收谱线Fig. 4 saturated absorption spectroscopy of Rb vapor cell for the transitions  $F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'$  of  $^{87}$ Rb D2 line with different cells at 50  $^{\circ}$ C

之所以出现上述现象,是由饱和吸收的基本物理原理决定的。所谓饱和吸收主要不是饱和效应(主要在二能级系统中显著),而是一种速度选择光抽运效应的表现:激光束通过分光板分成较强的泵

浦光束和较弱的探测光束,它们以基本重合但传播方向相反的路径穿过气体样品,当激光频率扫描到其原子或分子的精细能级的共振频率时,根据多普勒效应,只有速度为零或在探测光路径上速度分量为零的那部分原子或分子由于其多普勒频移为零,才能同时与泵浦光和探测光发生共振相互作用,此时,原子被较强的泵浦光束激励达到饱和状态,即吸收原子几乎全部被泵浦光束激励到高能态去,探测光束几乎没有被原子吸收就通过了气体吸收室,而且较弱的探测光避免了能量展宽,因而谱线呈吸收弱的尖峰即超精细跃迁,这样饱和吸收光谱就把那些对光束无多普勒频移的原子挑选出来,其光谱是无多普勒增宽的。由于热运动,原子在又光矢方向有一定的速度分布,当激光频率正好扫到某两对超精细跃迁频率中间时,根据多普勒效应,合适速度的原子感受迎面而来的泵浦光从而频率升高后正好与频率高的那对超精细跃迁共振,同时这些原子感受反方向探测光则频率降低,正好与频率低的那对超精细跃迁共振,两对超精细跃迁对应着相同的基态,因此在泵浦光抽运下,基态原子减少,使得对反方向探测光的吸收减少,从而出现交叉共振峰<sup>[4-5]</sup>。泵浦光的光泵浦效率为<sup>[6]</sup>:

$$\eta \sim \frac{\Omega^2 \gamma_N t}{(\Delta + \kappa \vec{v})^2 + \Gamma^2}$$

式中, $\Omega$ 为拉比频率; $\gamma_N$ 为铷 D2 线的自发衰减速率; $t$ 为铷原子与激光束的作用时间; $\Delta$ 为频率失谐; $\Gamma$ 为均匀展宽和非均匀展宽之和, $k = 2\pi/\lambda$ 。由上式可知,泵浦光的泵浦效率随原子与激光的作用时间正比变化,当样品池的厚度减小到特别薄,达到微米量级的时候,原子和激光束相互作用的时间就取决于热运动原子的速度矢量,原子的速度矢量垂直于样品池壁的时候,在和壁面碰撞之前原子与激光束作用的时间非常短,泵浦光的泵浦效率非常低,激发态上原子非常少,导致对探测光的吸收非常强烈,

交叉共振峰的幅度会降低;另一方面,速度矢量平行于壁面的原子和激光束作用的时间比较长,而这些原子在光传播方向的速度分量很小以至于为零,对交叉共振峰没有贡献。随着样品池厚度的进一步减小,当降低到纳米量级的时候,交叉峰就会消失<sup>[6]</sup>。

#### 4 结 论

通过对薄铷汽室饱和吸收光谱的测量,我们知道对于薄汽室而言,要获得最佳的饱和吸收谱线必须把它加热到最佳温度,300  $\mu\text{m}$  铷汽室的最佳工作温度为 50  $^\circ\text{C}$ ,同时可以减小交叉共振峰的幅度,使得饱和吸收光谱技术的应用变得简单,为以后微型 CPT 原子钟的研究奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Goldsmith J E M, Weber E W, Hansch T W. New measurement of the rydberg constant using polarization spectroscopy of  $\text{H}\alpha$  [J]. Phys. Rev. Lett, 1978, 41 (22): 1525 - 1528.
- [2] Salomon C, Dalibard J, Phillips W D, et al. Laser cooling of cesium atoms below 3  $\mu\text{K}$  [J]. Eur. Lett, 1990, 12 (8): 683 - 688.
- [3] Wansch T W, Shahin I S, Schawlow A L. High-resolution saturation spectroscopy of sodium D lines with a pulsed tunable dye laser [J]. Phys Rev Lett, 1971, 27: 707 - 710.
- [4] Maguire L P, van Bijnen Rm, Mese E, et al. Theoretical calculation of saturated absorption spectra for multi-level atoms [J]. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys, 2006, 39: 2709 - 2720.
- [5] Smith D A, Hughes I G. The role of hyperfine pumping in multilevel systems exhibiting saturated absorption [J]. Am. J. Phys, 2004, 72: 631 - 637.
- [6] A Sargsyan, D Sarkisyan, A Papoyan. Saturated absorption spectroscopy: elimination of crossover resonances by use a nanocell [J]. Laser. phys, 2008, 18(6): 749 - 755.