

芯片原子钟相干布居囚禁谱线特性研究

尹毅 张奕 谭伯仲 陈杰华 顾思洪

Study on characteristics of coherent population trapping spectral line for chip-scale atomic clock

Yin Yi Zhang Yi Tan Bo-Zhong Chen Jie-Hua Gu Si-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

**Rb<sup>87</sup> 冷原子电磁感应透明吸收曲线不对称性的分析**

**Analysis on the absorption curve asymmetry of electromagnetically induced transparency in Rb<sup>87</sup> cold atoms**

物理学报.2015, 64(3): 034206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034206>

**二维电磁感应光子带隙的动态生成与调控**

**Dynamic generation and manipulation of electromagnetically induced 2D photonic band-gaps**

物理学报.2014, 63(22): 224203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224203>

**一维冷原子晶格中相干诱导三光子带隙**

**Tunable three photonic band-gaps coherently induced in one-dimensional cold atomic lattices**

物理学报.2014, 63(3): 034209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034209>

**四能级双V型原子系统中考虑自发辐射相干的无粒子数反转激光**

**Lasing without inversion with considering spontaneously generated coherence**

物理学报.2013, 62(16): 164207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164207>

**三能级闭合环路系统控制的位相和幅度相关的无反转增益**

**Phase and amplitude-dependent inversionless gain controlled by a three-level closed loop system**

物理学报.2013, 62(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104206>

# 芯片原子钟相干布居囚禁谱线特性研究\*

尹毅<sup>1)</sup> 张奕<sup>1)†</sup> 谭伯仲<sup>2)</sup> 陈杰华<sup>1)</sup> 顾思洪<sup>1)2)</sup>

1)(中国科学院武汉物理与数学研究所, 武汉 430071)

2)(华中科技大学物理学院, 武汉 430074)

(2014年7月22日收到; 2014年8月18日收到修改稿)

通过微型原子蒸汽室产生质量满足要求的相干布居囚禁(CPT)信号是实现芯片原子钟的关键之一. 本实验通过对光源实施频率调制和对光场与<sup>87</sup>Rb原子作用产生的信号作相敏解调获得高信噪比的CPT微分谱线, 利用CPT微分谱线研究了CPT信号随工作参数变化的规律以及信号质量对原子钟频率稳定度的影响, 所获研究结果与理论模型预期相符合, 实验结果为芯片原子钟推荐了最佳工作参数. 实验所采用的方法利用芯片原子钟自身的资源就可以实施, 因此为芯片原子钟开展性能研究和实施工作参数优化提供了实用的手段.

**关键词:** 相干布居囚禁, 原子钟, 激光

**PACS:** 42.50.Gy, 95.55.Sh, 32.30.Bv

**DOI:** 10.7498/aps.64.034207

## 1 引言

双色光与原子三能级系统的相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)共振可以产生窄线宽谱线<sup>[1]</sup>, 采用CPT共振谱线作为微波鉴频信号实现的CPT原子钟不需要微波腔<sup>[2-4]</sup>. 由于不受微波腔体积的限制, 通过微机电系统(micro electro mechanical systems, MEMS)工艺可以制出体积约为10 mm<sup>3</sup>的芯片物理系统<sup>[5]</sup>, 配合专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC)技术制出芯片电路, 就可实现芯片原子钟<sup>[6]</sup>.

MEMS工艺制作的微型原子蒸汽室(微室)容积仅为mm<sup>3</sup>量级, 如何通过微室中的原子蒸汽获得满足原子钟要求的微波鉴频信号是实现芯片原子钟的关键. 我们采用容积约为6 mm<sup>3</sup>的微室针对芯片原子钟开展了实验研究, 获取了CPT共振信号并研究了相关性能, 为我们后续研制的芯片原子钟提供了有价值的知识, 本文介绍我们所开展的实验方法和获得的研究结果.

## 2 实验方法与装置

实验采用微室为半径 $r = 1.1$  mm, 厚度 $L = 1.5$  mm的圆柱体, 微室中封入<sup>87</sup>Rb和作为缓冲气体的N<sub>2</sub>. 处于CPT态的<sup>87</sup>Rb原子会与微室壁发生碰撞, 这种非弹性碰撞使CPT态的<sup>87</sup>Rb原子弛豫损耗, 选择能与<sup>87</sup>Rb原子作弹性碰撞的原子作为缓冲气体可以减小<sup>87</sup>Rb原子与微室壁碰撞概率, 从而减少CPT态原子损耗. 本实验采用N<sub>2</sub>作为缓冲气体, 当微室温度为90 °C时其压强为20.5 kPa. 为了获得较好的长期频率稳定度, 原子钟通常用正/负温度系数的两种气体按一定比例配成缓冲气体以减小温度变化对频率的影响<sup>[7]</sup>. 本实验目的是研究CPT信号质量, 因此我们暂时不考虑原子钟的长期频率特性, 仅采用单一气体N<sub>2</sub>作为缓冲气体. 与其他缓冲气体相比, N<sub>2</sub>对Rb原子有荧光猝灭效果, 即N<sub>2</sub>与Rb原子第一激发态碰撞能够实现碰撞能量转移, 因此还具有减少第一激发态自发辐射荧光对CPT态原子的消相干作用<sup>[8]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号: 11304362, 11204351)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyi@wipm.ac.cn

实验沿用本组之前所用装置<sup>[9,10]</sup>, 具体设置如图1所示, 实验中根据需要将<sup>87</sup>Rb微室与<sup>87</sup>Rb玻璃泡切换. 图中微室之外设置的螺线管为原子提供约100 mG ( $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ) 磁场, 磁场为光-原子相互作用提供量子化轴并通过 Zeeman 移动消除原子磁子能级简并选出对磁场不敏感的  $m_F = 0$  子能态. 螺线管外采用坡莫合金筒实施电磁屏蔽, 防止环境杂散电磁场的干扰. 坡莫合金筒之外设置加温器件和温度传感器对微室实施加温、控温. 光源器件是垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting Laser, VCSEL), 实验所用的 VCSEL (ULM795-01-TN-S46FOP) 约在环境温度为  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时输出实验所需的波长为 795 nm 的线偏振激光, 频谱宽度约 100 MHz, 光束为圆形光斑的发散光束. 图1中凸透镜将发散光转化为光斑直径约为 1.5 mm 的平行光,  $\lambda/4$  波片将线偏振光转变为圆偏光与原子按  $\Lambda$  构型实现 CPT 共振<sup>[9,10]</sup>, 可变衰减片根据实验需要调节光强, 光电探测器 (PD) 探测携带光与原子作用信息的透射激光强度.

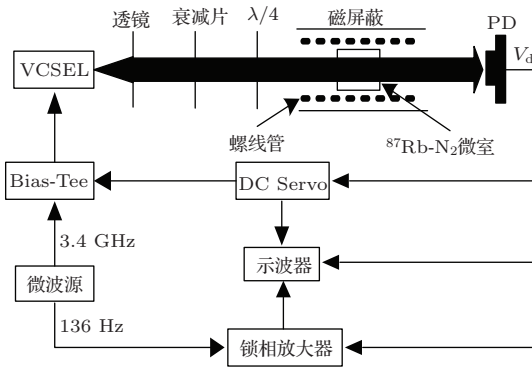


图1 实验装置

VCSEL 固定在自制的集成了温度传感器和 TEC 的基座上, 实验时用控温器 (THORLABS TED200C) 实施控温, 将 VCSEL 的环境温度稳定在  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . 微室则通过自制的控温电路控制, 根据实验需要控制在指定温度.

当控温于  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , VCSEL 由自制的 DC Servo 电路提供的直流电流驱动输出与 <sup>87</sup>Rb 作用所需的 795 nm 激光. 因 <sup>87</sup>Rb 基态超精细能级裂距约为 6.8 GHz, 为了获得与 <sup>87</sup>Rb 原子发生 CPT 共振所需的相干双色光, 实验中用微波源 (Agilent E857D) 提供频率约为 3.4 GHz 的微波信号, 微波信号通过 Bias-Tee (Mini-circuits ZX85-12G+) 与直流电流

叠加作为 VCSEL 的驱动电流, 使 VCSEL 输出频率间隔约为 3.4 GHz 的调频多色光, 实验中利用其中的  $\pm 1$  级边带与 <sup>87</sup>Rb 原子实现 CPT 共振.  $\pm 1$  级边带占总激光功率的比例依赖于微波功率, 实验时我们先将图1中的微室切换为体积约为  $3 \text{ cm}^3$  的 <sup>87</sup>Rb 玻璃泡, 借助由玻璃泡获得的较强的 <sup>87</sup>Rb 与多色光的作用谱开展研究. 通过调节微波功率获得的不同作用谱确定 VCSEL 的  $\pm 1$  级边带光功率之和所占总激光功率的比例<sup>[11]</sup>, 实验获得的最大比例为 45%, 本文介绍的实验结果就是用这样功率比的激光获得的.

### 3 实验结果与讨论

图2(a)是在将 VCSEL 和微室分别控温于  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , 微波频率和功率保持不变的条件下, 通过改变驱动电流的 DC 部分而改变激光频率获得的 <sup>87</sup>Rb 原子对多色激光的吸收谱. 实验中将微室控温于较高温度以蒸发出较多 <sup>87</sup>Rb 原子参与作用, 与本组之前采用玻璃原子蒸汽泡所获吸收谱相比<sup>[12]</sup>, 更强的 Doppler 展宽使得图2(a)所示吸收谱的谱线已不能充分分辨. 图2(b)是通过调制-相敏解调技术记录的图2(a)谱的微分形式谱. 为了实施相敏解调, 我们在 DC Servo 输出的 DC 中施加了 5 kHz、100 nA 的浅幅调制, 利用 DC Servo 中的锁相环电路对 PD 输出的光电信号作相敏解调而获得图2(b)所示的微分谱. 图2(a)谱中幅度最大的吸收谱线被用作激光频率的鉴频信号<sup>[12]</sup>, 将激光频率稳定在图2(b)所标锁频点对应的频率, 即图2(a)最大吸收谱线极值所处的激光频率上.

图3是在将激光频率锁定的条件下, 通过扫描微波频率获得的 CPT 共振信号. 因为信号信噪比较差, 图3(a)中通过步进调节微波频率, 对每一频率作多次记录后求平均值作为该频率处的信号幅度实验值, 图中实线是用洛伦兹线型对实验值拟合获得的 CPT 谱线. 虽然实验室研究中可以通过各种更高效手段, 例如在光路中增设斩光器对激光作幅度调制, 配合相敏解调获得 CPT 谱线, 但是这类需要增加资源的实验方案, 用实际 CPT 原子钟是无法开展相应实验的. CPT 原子钟通常通过频率调制-相敏解调方法抑制噪声的同时直接获得实施频率负反馈所需要的微分形式 CPT 谱线, 以实施

微波频率稳频. 以芯片原子钟应用为研究背景, 我们采用芯片原子钟可用方案开展实验, 通过微分谱线开展研究, 实验中用微波源 (Agilent E857D) 输出受到 2FSK 调制的 3.4 GHz 微波信号, 调制频率为 136 Hz, 以避开工频及其谐波, 调制幅度为 80 Hz. 微波源同时输出 136 Hz 参考信号, 锁相放大器

(EG&G 7260 DSP LIA) 根据参考信号对 PD 输出的携带 CPT 共振信息的光电信号作相敏解调, 解调结果如图 3(b) 所示. 实验中 CPT 谱线线宽大于 1 kHz, 我们选择的调制幅度远小于谱线线宽, 因此相敏解调所得差分结果可以近似为微分形式 CPT 谱线.

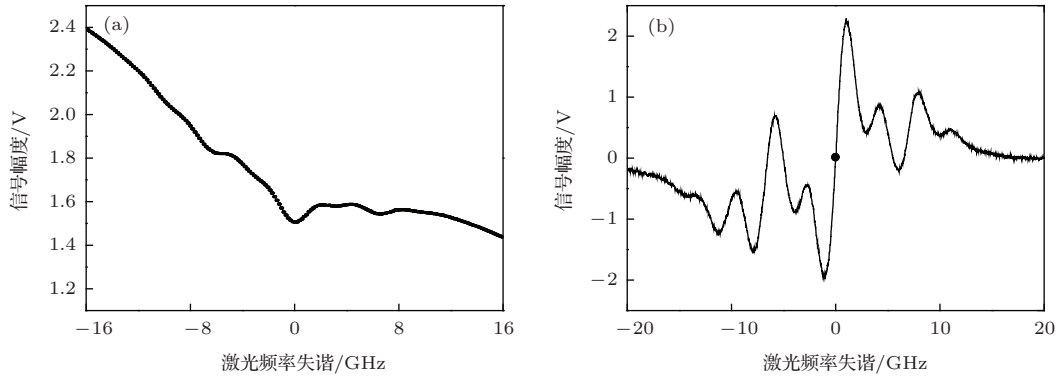


图 2 实验记录的谱线 (a)  $^{87}\text{Rb}$  原子对多色光的多普勒吸收谱线; (b) 通过相敏解调获得的微分形式多普勒谱线, 图中黑点为锁频点, 对应 (a) 中的吸收谱最低点处的频率

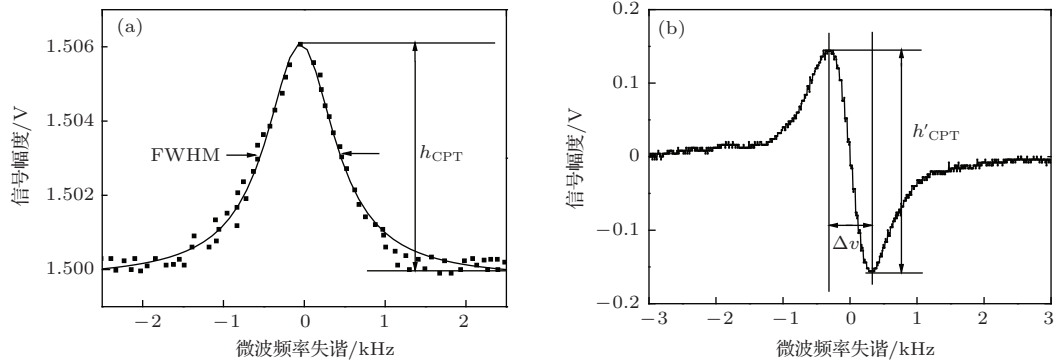


图 3 CPT 谱线, 微室温度为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , 入射光强为  $6\text{ }\mu\text{W}/\text{mm}^2$  (a) CPT 幅度谱线; (b) 通过相敏解调获得的微分形式 CPT 谱线

一般地, CPT 信号幅度越大、线宽越窄, 原子钟的性能越好. 因为芯片原子钟的微室容积小, 为了增加信号幅度通常要设置较高的微室温度以蒸发出较多原子参与工作, 然而随温度升高、信号幅度增大会伴随出现谱线线宽增宽、碰撞消相干效应增加等其他负面效果, 温度过高还会造成 CPT 信号幅度反而变小<sup>[13]</sup>, 因此需要研究、确定最佳工作温度. 另外激光强度和其他相关参量也需要研究、优化.

### 3.1 温度与谱线质量

芯片原子钟的微室工作在较高温度才能获得信号质量比较理想的鉴频信号, 较高温度使原子对光的吸收效应增强, 激光通过微室后光强有所减

弱. 采用密度矩阵方程结合 Maxwell 传播方程来描述光与原子作用的过程, 这样透射光拉比频率与微波失谐量  $\Delta$  的关系为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} & \ln \frac{\omega_r^2(L)}{\omega_r^2(0)} + \frac{\omega_r^2(0)}{\gamma\Gamma} \left[ \frac{\omega_r^2(L)}{\omega_r^2(0)} - 1 \right] \\ & - \frac{\Delta^2}{\gamma^2} \ln \frac{\gamma^2 + \Delta^2 + \gamma\omega_r^2(L)/\Gamma}{\gamma^2 + \Delta^2 + \gamma\omega_r^2(0)/\Gamma} \\ & = -\frac{\alpha}{\Gamma}L, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  是基态超精细能级间的相干弛豫,  $\gamma = \gamma_w + \gamma_{bg} + \gamma_{se}$ ,  $\gamma_w$  是  $^{87}\text{Rb}$  原子与泡壁的碰撞弛豫,  $\gamma_{bg}$  是  $^{87}\text{Rb}$  原子与缓冲气体的碰撞弛豫,  $\gamma_{se}$  是  $^{87}\text{Rb}$  原子之间的自旋交换弛豫, 这几个量与微室温度相关, 有成熟表达式可以计算获得, 所以  $\gamma$  可根据微室温度计算确定<sup>[15]</sup>.  $\Gamma = \Gamma_0 + kP$ ,  $\Gamma_0 = 38$

MHz 为  $^{87}\text{Rb}$  激发态自然衰减率, 与缓冲气体碰撞对  $\Gamma$  的增宽为  $kP$ ,  $k = 122 \text{ MHz/kPa}$  为  $\text{N}_2$  对  $^{87}\text{Rb}$  原子第一激发态的压力展宽系数<sup>[16]</sup>, 根据封入  $\text{N}_2$  微室的初始压强可推算出任意温度时的  $P(T)$ , 进而获得  $\Gamma(T)$ .

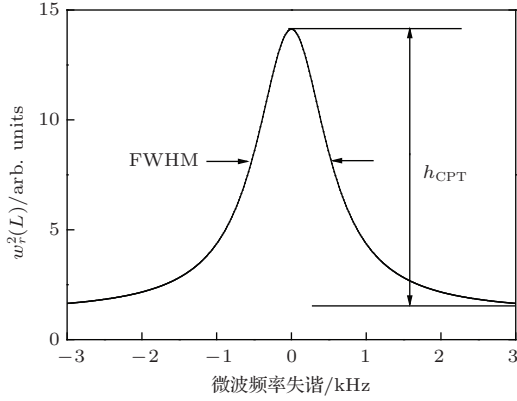


图4 由(1)式获得的典型谱线

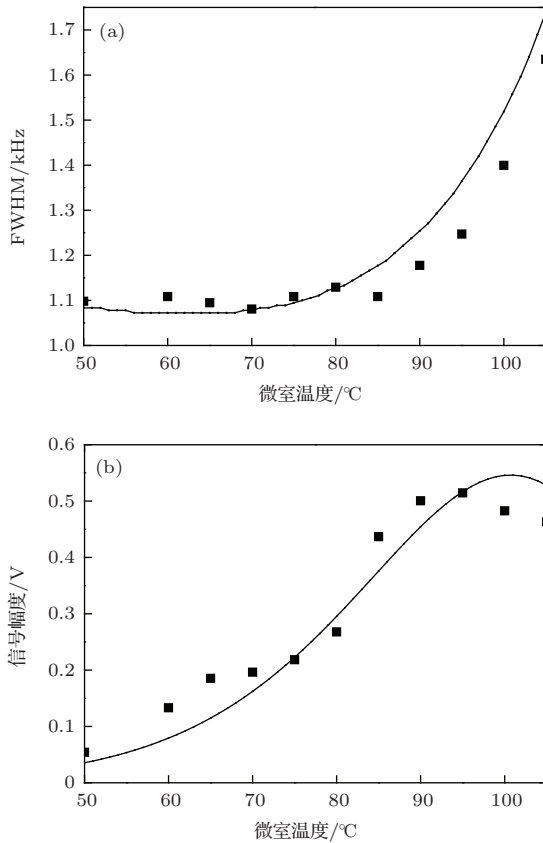


图5 实验值在光强为  $6 \mu\text{W}/\text{mm}^2$  条件下获得, 实线是根据(1)式计算得出的曲线 (a) FWHM 实验值与计算值的比较; (b)  $h_{\text{CPT}}$  实验值与计算值的比较

$L$  为微室厚度,  $\omega_r(0)$  为入射光拉比频率,  $\omega_r(L)$  是微室出射光的拉比频率. 通过(1)式即可获得不同温度时透射光拉比频率  $\omega_r^2(L)$  与微波失谐量  $\Delta$

的关系, 图4所示洛伦兹曲线就是由(1)式获得的典型 CPT 谱线计算结果.

因为通过微室获得的 CPT 信号质量差, 因此图3(a)通过逐点平均方法才获得 CPT 谱线, 进而得到线宽 FWHM. 考虑到芯片钟容易获得 CPT 信号的微分形式谱线, 且 CPT 谱线是洛伦兹线型, 其谱线 FWHM 与它的微分函数的峰峰值频差  $\Delta\nu$  之间具有关系式  $\text{FWHM} = \sqrt{3}\Delta\nu$ , 因此可以利用由实验获得微分信号的  $\Delta\nu$  确定 CPT 谱线的 FWHM. 作为洛伦兹曲线, CPT 谱线的幅度  $h_{\text{CPT}}$  与微分信号峰峰值的幅度差  $h'_{\text{CPT}}$  和频率差  $\Delta\nu$  的关系为  $h_{\text{CPT}} = \frac{2}{3}h'_{\text{CPT}}\Delta\nu$ , 因此也可以由实验获得的  $h'_{\text{CPT}}$  和  $\Delta\nu$  确定  $h_{\text{CPT}}$ . 我们通过这种方法, 实验研究了 FWHM 和  $h_{\text{CPT}}$  与温度的依赖关系, 图5给出实验结果与按(1)式获得的计算结果的比较.

### 3.2 光强与频率稳定度

CPT 原子钟的频率稳定度  $\sigma$  与激光光强密切相关, 在原子钟的调试、优化过程中可以采用改变光强, 测量相应的  $\sigma$  而确定最佳光强, 但这样的光强参数优化过程非常耗时. CPT 原子钟的频率稳定度为<sup>[17]</sup>

$$\sigma(\tau) \propto \frac{1}{q}\tau^{-1/2}, \quad (2)$$

式中  $q = \frac{1}{h_B} \frac{h_{\text{CPT}}}{\text{FWHM}}$ ,  $h_B$  是图3所示 CPT 谱线的本底信号幅度. 通过改变光强测量 CPT 幅度信号, 由谱线与  $q$  对应的三个量研究和确定  $q$  的极大值, 即实现光强对最佳  $\sigma$  的优化. 然而, 芯片钟可获得的 CPT 幅度信号质量差, 按获得图3(a) CPT 谱线的实验方法难以实施光强优化. 定义  $Q = \frac{h_{\text{CPT}}}{\text{FWHM}}$ , 则  $q = Q/h_B$ , 因为芯片原子钟的 CPT 信号的本底  $h_B$  随光强的变化率远小于  $Q$ , 因此  $Q$  与  $q$  的极大值对应的光强很接近, 如果获得  $Q$  的极大值, 在小范围改变光强就能获得  $q$  的极大值, 因此通过优化  $Q$  就可初略确定最佳  $\sigma$ . 因此, 本实验利用 CPT 微分信号开展了  $Q$  值随光强变化特性的实验研究, 图6(a) 给出特定光强所对应的  $Q$  值随温度变化的两例典型实验结果. 实验结果表明: 对应不同光强所采用的微室都在约  $90^\circ\text{C}$  时达到  $Q$  极大值, 图6(b) 是微室温度为  $90^\circ\text{C}$  时  $Q$  值随光强变化的

实验结果. 在芯片原子钟实际调试优化过程中, 我们获得的最佳 $\sigma$ 都是在最大 $Q$ 值的工作点略微改变光强而获得.

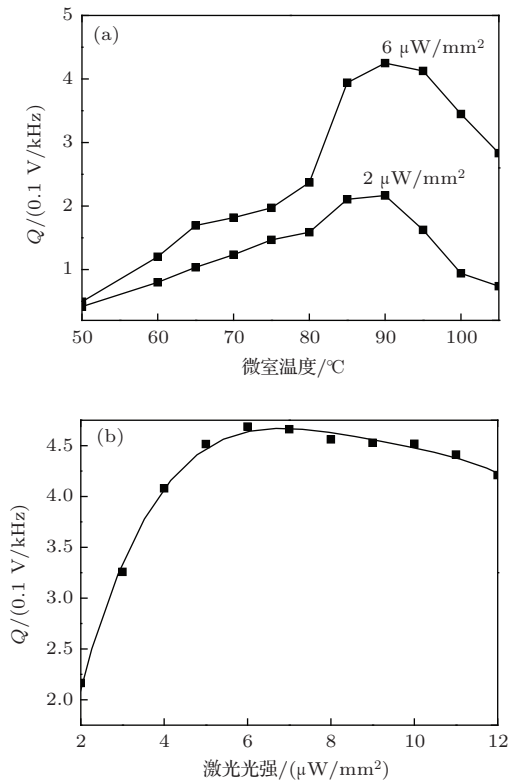


图6 (a) 不同光强下温度与 $Q$ 值的关系; (b) 微室温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 时光强与 $Q$ 值的关系, 其中实线为多项式拟合结果

### 3.3 微室潜力探讨

实验还研究了室温下的CPT谱线质量, 图7是在微室温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时实验记录的谱线, 作为比较还给出了 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时所获谱线. 由图可见虽然与 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时所获谱线相比信号质量有较大差距, 但在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 仍可获得清晰的CPT谱线. 在原子容器内壁镀石蜡膜可以有效防止CPT态原子与微室壁碰撞的

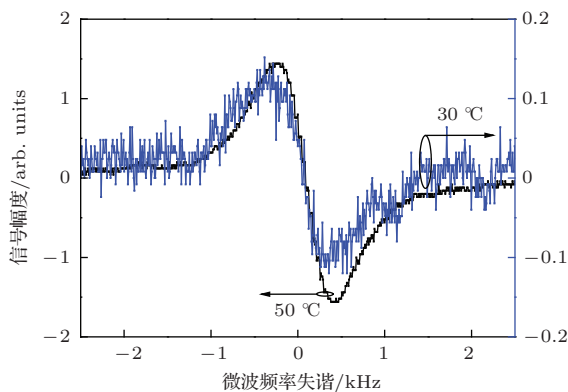


图7 室温条件下实验记录的CPT微分谱线

消相干效应, 但是石蜡膜不适合应用于超过 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温环境. 对于室温工作环境, 如果采用镀石蜡膜、充适合室温的缓冲气体压强的微室, 将能够获得信号质量大幅度改善的CPT信号, 再配合增强信号处理功能等措施, 容积 $\text{mm}^3$ 量级的微室有条件在室温条件下获得应用.

## 4 结 论

我们对用于芯片原子钟的微室产生的CPT谱线的线宽、幅度随温度变化的特性开展了实验研究, 同时用CPT谱线理论模型开展了计算研究, 获得的计算结果与实验结果相互符合, 说明所采用的理论模型能够描述微室产生的CPT谱线特性, 可以用于分析、解释、预测微室CPT谱线的变化规律; 通过微室产生的CPT谱线对芯片原子钟的频率稳定度随激光光强变化的特性开展了研究, 获得了芯片原子钟频率稳定度随光强变化的规律. 本实验采用芯片原子钟可以实施的实验方案开展研究, 因此研究结果为芯片原子钟提供了实施光强参数优化的有效方法, 本实验对所研究的微室CPT信号对应的最佳工作温度和最佳光强对于研制芯片原子钟作了积累, 我们研制成功的芯片原子钟利用了本文所介绍的实验研究结果.

除了针对芯片原子钟研究微室产生的CPT谱线的特性, 本实验工作还为芯片原子钟开展物理特性研究和参数优化探索了方法, 实验所采用的是通过芯片原子钟可以实施的实验方案, 因此在调试芯片原子钟时可以用所探索出的方法开展相关特性研究, 实施性能调试, 参数优化.

我们还对微室工作于较低温度的潜力作了探讨, 用处于室温的微室获得了CPT谱线, 通过对实验结果的分析、论证, 指出容积为 $\text{mm}^3$ 量级、工作于室温的微室具有应用潜力.

## 参考文献

- [1] Alzetta G, Gozzini A, Moi L, Orriols G 1976 *Il Nuovo Cimento B* **36** 5
- [2] Vanier J 2005 *Appl. Phys. B* **81** 421
- [3] Yang J, Liu G, Gu S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 043202 (in Chinese) [杨晶, 刘国宾, 顾思洪 2012 物理学报 **61** 043202]
- [4] Qu S, Zhang Y, Gu S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 099501
- [5] Knappe S, Schwandt P D D, Shah V, Hollberg L, Kitching J, Liew L, Moreland J 2005 *Opt. Express* **13** 1249

- [6] Youngner D W, Lust L M, Carlson D R, Lu S T, Forner L J, Chanhvongsak H M, Stark T D 2007 *The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* Lyon, France, June 10–14 2007 p39
- [7] Vanier J, Kunski R, Cyr N, Savard J Y, Têtu M 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 5387
- [8] Deng K, Guo T, He D, Liu X, Liu L, Guo D, Chen X, Wang Z 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 1104
- [9] Du R, Liu G, Chen J, Gu S 2008 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **28** 1697 (in Chinese) [杜润昌, 刘国宾, 陈杰华, 顾思洪 2008 光谱学与光谱分析 **28** 1697]
- [10] Liu G, Gu S 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 035004
- [11] Hunter B A 2005 *PCT Patent* WO 2005/012925 A2 [2005-02-10]
- [12] Du R, Liu G, Chen J, Wang J, Liu Ch Y, Gu S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6117 (in Chinese) [杜润昌, 刘国宾, 陈杰华, 王瑾, 刘朝阳, 顾思洪 2009 物理学报 **58** 6117]
- [13] Knappe S, Kitching J, Hollberg L, Wynands R 2002 *Appl. Phys. B* **74** 217
- [14] Godone A, Levi F, Micalizio S, Vanier J 2002 *Eur. Phys. J. D* **18** 5
- [15] Boudot R, Dziuban P, Hasegawa M, Chutani R, Galliou S, Giordano V, Gorecki C 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 014912
- [16] Rotondaro M D, Perram G P 1997 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **57** 497
- [17] Vanier J, Bernier L G 1981 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **30** 277

## Study on characteristics of coherent population trapping spectral line for chip-scale atomic clock\*

Yin Yi<sup>1)</sup> Zhang Yi<sup>1)†</sup> Tan Bo-Zhong<sup>2)</sup> Chen Jie-Hua<sup>1)</sup> Gu Si-Hong<sup>1)2)</sup>

1) (Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

2) (School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 22 July 2014; revised manuscript received 18 August 2014 )

### Abstract

To Obtain an appropriate coherent population trapping (CPT) signal through a miniature atomic vapor cell is one of the key steps to implement a chip-scale atomic clock (CSAC). In the present experiment, the high S/N differential CPT spectral line has been achieved with a miniature atomic vapor cell through modulating the laser and extracting <sup>87</sup>Rb atom laser interacting signal using the phase sensitive demodulation technique. With the spectral line, the dependence of CPT signal on the working parameters and the dependence of frequency stability of CSAC on the quality of the CPT signal have been studied; the obtained experimental results agree well with the theoretical prediction, which can be used as the recommended working parameters for CSAC. The methods exploited in the experiment can be implemented in the resource of a CSAC, therefore this experiment explores for CSAC the practical approaches of performance optimization.

**Keywords:** coherent population trapping, atomic clock, laser

**PACS:** 42.50.Gy, 95.55.Sh, 32.30.Bv

**DOI:** 10.7498/aps.64.034207

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11304362, 11204351).

† Corresponding author. E-mail: zhangyi@wipm.ac.cn