

锶原子三重态双耦合场下的原子相干谱观测

任兆麟^{1,2}, 王叶兵^{1,2}, 韩建新^{1,2}, 孔德欢¹, 张首刚¹, 常 宏¹

¹中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以磁光阱中的锶冷原子为介质, 对三重态双耦合场下的伞型结构电磁诱导透明(EIT)效应进行了实验观测。对实验中涉及到的抽运激光采用 Pound-Drever-Hall 稳频技术和注入锁定技术, 对弱探测光进行功率稳定, 提高了实验的观测精度。实验结果证明, 耦合光的失谐量对三重态 EIT 有较大影响, 且该 EIT 线形是两个 Λ 型结构 EIT 线形的简单叠加。

关键词 原子与分子物理学; 量子光学; 电磁诱导透明; 原子相干; 三重态

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0402001

Observation of Atomic Coherence in Strontium Triplet with Double Coupling Fields

Ren Zhaolin^{1,2}, Wang Yebing^{1,2}, Han Jianxin^{1,2}, Kong Dehuan¹,
Zhang Shougang¹, Chang Hong¹

¹Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The umbrella-type triplet electromagnetically induced transparency (EIT) effect driven by two coupling fields with strontium cold atoms in the magneto-optical trap as medium is observed experimentally. The Pound-Drever-Hall frequency stabilization technique and the injection locking technique are applied to the pumping laser in the experiment, and the power stabilization technique for the weak probe laser is also used. The experimental observation precision is improved by these techniques. The experimental results prove that the detuning of coupling lights has relatively great influence on the triplet EIT. Moreover, the line shape of EIT is a simple superposition of two Λ -type EIT line shapes.

Key words atomic and molecular physics; quantum optics; electromagnetically induced transparency; atomic coherence; triplet

OCIS codes 020.1670; 300.2530; 300.6210

1 引 言

自激光出现以来, 为更好地揭示光场与原子系统相互作用的本质, 研究人员对光与物质间的作用进行了深入研究。其中, 多能级原子与相干光场相互作用时出现的原子相干性, 可诱发一系列诸如电磁诱导透明(EIT)^[1-2]、电磁诱导吸收^[3]、相干布居俘获^[4]等独特的光学现象, 成为近年来量子光学领域最热门的研究方向之一。EIT 的本质是相干电磁场与多能级原子系统相互作用而产生的原子态之间的量子干涉, 对 EIT 的研究具有重要价值^[5], 其应用范围涉及无反转光放大^[6]、光速减慢^[7]等多个方面。

收稿日期: 2016-10-27; **收到修改稿日期:** 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(11474282)、国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制专项(61127901)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-JSC004)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030700)

作者简介: 任兆麟(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光频标方面的研究。E-mail: rzlin1992@163.com

导师简介: 常 宏(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事量子光学和光频标方面的研究。

E-mail: changhong@ntsc.ac.cn(通信联系人)

研究人员已经在多种介质中观测到 EIT,包括稀土掺杂晶体^[8]、半导体量子阱^[9]以及原子^[1]等,其中对原子的研究以碱金属类居多。相对于常用来实现 EIT 的铷、铯等碱金属,铯原子作为碱土金属原子,其能级结构比碱金属原子的能级结构更加复杂,展现出更为丰富的物理内容,因而对铯等碱土金属的 EIT 研究成为近年来的热点^[10]。对于双耦合光参与的 Λ 型结构 EIT,研究人员进行了一系列相关研究。在双耦合光参与的 Λ 型结构中,当两束耦合光满足相位关联条件时,可通过调节激光场的相对相位来实现 EIT 窗口的调节^[11]。这一点在光开关、精密光谱测量等方面具有极大的应用价值。

目前,与 EIT 相关的研究主要集中在单态与单态的偶极跃迁及单态与三重态的互组跃迁上^[12-13],跃迁形式一般在基态与激发态之间,对三重态不同激发态的 EIT 研究相对较少。

本文以铯原子单态与三重态之间形成的伞型五能级系统为研究对象。首先对该五能级系统的结构特点进行简单分析,将其简化为两个 Λ 型三能级结构,之后在实验上实现这两个 Λ 型三能级结构 EIT 的同时观测及测量,为三重态 EIT 的深入研究提供一定的实验研究基础。

2 铯原子三重态 EIT 的能级分析

三能级 EIT 系统通常具有耦合-探测结构,一般有 Λ 型、V 型和级联型三种。以最典型的三能级 Λ 型(由一个高能级和两个低能级组成)原子结构的 EIT 为例。调节两束光的频率,当该频率与对应的能级跃迁频率一致时,原子的两个低能态便会建立相干性,产生量子干涉效应,原子被这两个低能态俘获而难以向高能级跃迁,形成暗态^[14]。此时介质对探测光的吸收减少,即发生了 EIT 现象。

铯原子的最外层有两个价电子,自旋耦合的不同形式使其能级结构分为单态及三重态^[15],图 1 所示为 ⁸⁸Sr 部分能级结构。为方便描述,下文中将能级 $(5s^2)^1S_0$ 记为 $|0\rangle$,能级 $(5s5p)^3P_j$ ($j=0,1,2$) 分别记为能级 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$,能级 $(5s6s)^3S_1$ 记为 $|4\rangle$ 。图 1 中 $|1\rangle-|4\rangle$ 跃迁波长为 679.289 nm,自然线宽为 4.0 MHz; $|2\rangle-|4\rangle$ 跃迁波长为 688.021 nm,自然线宽为 1.4 MHz; $|3\rangle-|4\rangle$ 跃迁波长为 707.202 nm,自然线宽为 7.0 MHz; $|0\rangle-|2\rangle$ 跃迁波长为 689.448 nm,自然线宽为 7.6 kHz。 ω_{14} 、 ω_{24} 、 ω_{34} 分别对应跃迁 $|1\rangle-|4\rangle$ 、 $|2\rangle-|4\rangle$ 和 $|3\rangle-|4\rangle$ 的共振频率。用频率为 ω_p 的探测光激发 $|2\rangle-|4\rangle$ 跃迁,频率为 ω_{c1} 和 ω_{c2} 的耦合光分别激发 $|1\rangle-|4\rangle$ 和 $|3\rangle-|4\rangle$ 跃迁。这三种光频率失谐量分别记为 $\Delta_p = \omega_{24} - \omega_p$, $\Delta_{c1} = \omega_{14} - \omega_{c1}$, $\Delta_{c2} = \omega_{34} - \omega_{c2}$ 。

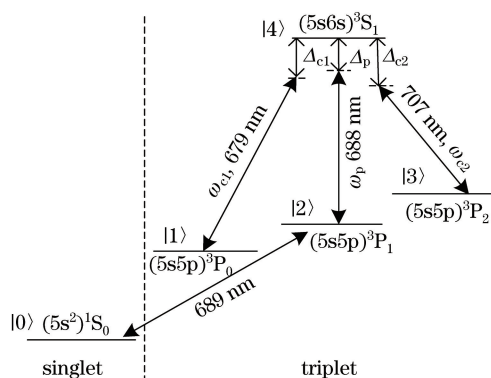


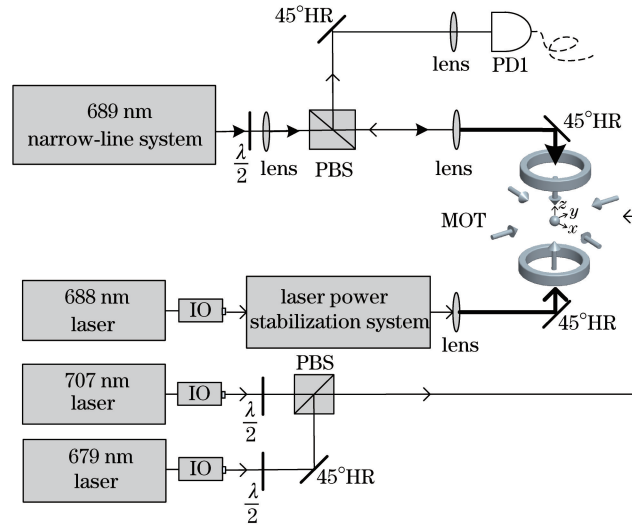
图 1 ⁸⁸Sr 部分能级结构

Fig. 1 Partial energy level structure of ⁸⁸Sr

通常情况下,原子在三重态上的布居数很少,导致三重态光谱无法直接观测。实验中, $|0\rangle-|2\rangle$ 对应 ⁸⁸Sr 能级跃迁中单重态与三重态间 $(5s^2)^1S_0-(5s5p)^3P_1$ 互组跃迁,该跃迁的存在可极大地增加三重态上的原子布居数,以便于三重态光谱的观测。因此, $|0\rangle-|2\rangle$ 作为抽运光跃迁存在,实验中需调节此跃迁对应的 689 nm 激光的功率及线宽,以增加三重态的原子布居数。添加耦合光后,三重态间可构成两个 Λ 型三能级结构(分别由 $|1\rangle-|4\rangle-|2\rangle$ 和 $|3\rangle-|4\rangle-|2\rangle$ 构成),低能级 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$, $|3\rangle$ 和 $|2\rangle$ 分别建立相干性,导致探测光的吸收谱上出现两个 EIT 窗口。综上,实验实际上是观测五能级伞型结构中两个 Λ 型三能级结构的 EIT 光谱。

3 三重态 EIT 观测实验装置

由能级分析可知,实验本质上提供了两套 Λ 型三能级结构,第一套以 707 nm 激光作为耦合光,以 688 nm 激光作为探测光;第二套以 679 nm 激光作为耦合光,以 688 nm 激光作为探测光。图 2 所示为实验观测铯原子三重态 EIT 的装置示意图。实验所用介质为经过一级冷却的⁸⁸Sr 原子,原子个数为 1×10^8 ,温度约为 5 mK^[16]。



IO: optical isolator; PBS: polarization beam splitter; PD: photodetector; MOT: magneto-optical trap; HR: high reflector

图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

实验用 689 nm 激光激发 $(5s^2)^1S_0 - (5s5p)^3P_1$ 互组跃迁以增加三重态原子布居数目,故 689 nm 激光的性能参数直接影响三重态 EIT 效应的观测。689 nm 激光光源采用光栅外腔反馈半导体激光器(ECDL, SYST DL Pro, Toptica, 德国),标准输出功率为 15 mW,自由运转时线宽约为 1 MHz。该线宽远大于互组跃迁的自然线宽 7.6 kHz,若直接利用此激光器的输出激光作为抽运光,抽运效率将非常低,故首先利用 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术^[17-18]压窄该激光器的输出激光线宽。为了测量压窄后的激光线宽,将两套线宽近似相同的 689 nm 窄线宽激光进行拍频,图 3 所示为两套 689 nm 窄线宽激光的拍频信号。谱仪的分辨率带宽为 100 Hz,信号的半峰全宽(FWHM) $\omega_{1/2} = 330$ Hz,此时激光的线宽大约为 230 Hz^[19]。

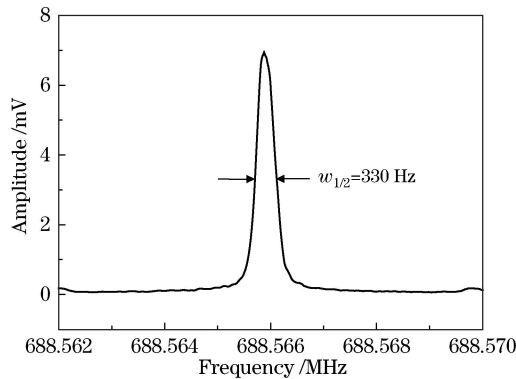


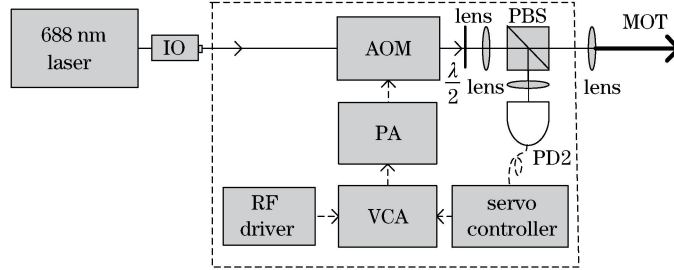
图 3 两套 689 nm 窄线宽激光的拍频信号

Fig. 3 Beat signal of two sets of 689 nm narrow-linewidth lasers

此外,实验所需的 689 nm 激光功率需大于 5 mW,而激光器输出的光经过隔离器后线宽压窄,再经声光调制器(AOM)以及光纤传输后,功率值耗散约 70%,不能很好地满足实验要求。采用注入锁定技术^[20]将激光功率放大,将与原子作用的 689 nm 激光功率提高至 10 mW 左右。最后,将激光扩束至 $1/e$ 直径为 2.5 cm,并垂直入射到磁光阱(MOT)中,与原子团相互作用。

实验中提供的耦合光 679 nm 激光和 707 nm 激光均采用 ECDL, 其中 679 nm 激光标准输出功率为 20 mW, 707 nm 激光标准输出功率为 35 mW。最终与原子团作用的 679 nm 激光功率为 5.5 mW, 707 nm 激光功率为 18 mW。

实验所用 688 nm 探测光(SYST DL Pro, Toptica, 德国), 最大可连续调谐量为 15 GHz, 标准输出功率为 10 mW, 实验时处于频率扫描状态。对于 EIT 研究, 探测光的功率值需要远小于耦合光的, 为弱功率光。实验中作为探测光的 688 nm 激光多次通过 AOM 以及光纤后, 功率起伏接近 10%, 功率的起伏势必对实验结果产生较大影响, 所以需要对 688 nm 激光进行功率稳定^[21]。图 4 所示为 688 nm 激光的功率稳定装置示意图。



RF: radio frequency; PA: power amplifier; VCA: voltage-controlled variable attenuator

图 4 688 nm 激光的功率稳定装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of power stabilization setup for 688 nm laser

688 nm 激光经偏振分束器(PBS)分束, 约 $50 \mu\text{W}$ 的光进入光电探测器 PD2(探头: S1337-33BR, 光敏面: $2.4 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$, 有效面积 5.7 mm^2 , 探测波段 $320 \sim 1100 \text{ nm}$), 之后连接伺服控制系统(LB1005, New Focus, 美国), 该模块将 PD2 检测到的信号放大, 并与直流参考信号进行差分, 得到的误差信号通过压控衰减器(VCA)及功率放大器(PA, 放大倍数 34 dB), 以此控制 AOM 的衍射, 实现 688 nm 激光的功率稳定, 稳定后的 688 nm 激光功率起伏小于 1.5×10^{-3} 。功率稳定后的 688 nm 激光经过扩束, 光斑的 $1/e$ 直径为 2.5 cm, 之后沿与 689 nm 激光相反方向垂直入射至 MOT 中, 经光电探测器 PD1(探头: S1337-33BR, 有关参数同 PD2), 并连接前置放大器(放大倍数 10^6)探测 688 nm 激光的吸收谱线, 利用示波器观察实验现象并记录实验数据。

4 实验现象与分析

图 5 所示为铯原子三重态在双耦合场作用下对 688 nm 探测光的吸收曲线。图中 689 nm 抽运光功率为 4.8 mW, 688 nm 探测光功率为 $50 \mu\text{W}$ 。耦合光的相干作用使探测吸收谱线上出现凹陷, 即 EIT 现象。

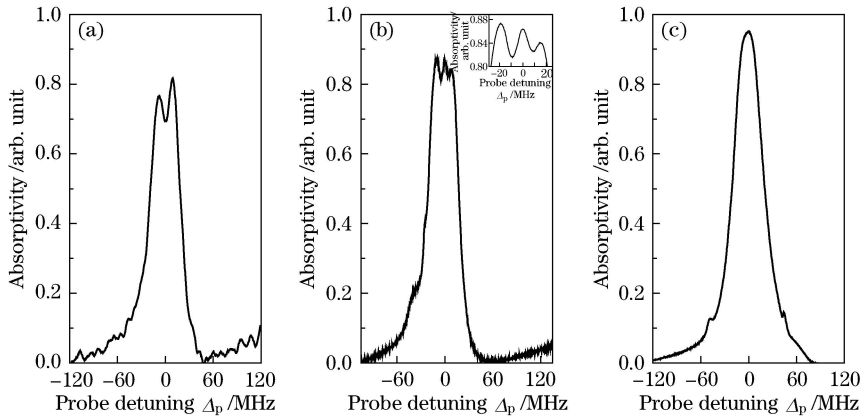


图 5 不同耦合光失谐下, 探测光吸收随探测光失谐的变化。(a) $\Delta_{c1} = 0 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = 0 \text{ MHz}$;

(b) $\Delta_{c1} = 5 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = -5 \text{ MHz}$; (c) $\Delta_{c1} = 50 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = -50 \text{ MHz}$

Fig. 5 Variance of probe absorption with probe detuning under different coupling-light detunings. (a) $\Delta_{c1} = 0 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = 0 \text{ MHz}$;

(b) $\Delta_{c1} = 5 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = -5 \text{ MHz}$; (c) $\Delta_{c1} = 50 \text{ MHz}$, $\Delta_{c2} = -50 \text{ MHz}$

图 5(a)所示为两个耦合场同时共振时所产生的 EIT 窗口的线性叠加,所以图中仅在探测场的中心频率处出现一个 EIT 窗口。图 5(b)和图 5(c)均为耦合光频率偏离共振时的探测吸收曲线,图 5(b)对应的 679 nm 耦合光失谐为 5 MHz,707 nm 耦合光失谐为 -5 MHz,图 5(c)对应的 679 nm 耦合光失谐为 50 MHz,707 nm 耦合光失谐为 -50 MHz,其中探测吸收曲线左侧的 EIT 窗口对应 707 nm 耦合光,右侧窗口对应 679 nm 耦合光。由图 5 可以看出,随着耦合光失谐的增大,对应 EIT 窗口的位置逐渐偏离探测吸收峰最高点,且窗口深度越来越小,因此可通过控制耦合光的失谐来控制 EIT 窗口的位置及深度。

图 5(a)中 EIT 窗口线宽是 13 MHz。图 5(b)中插图是对 EIT 窗口的局部放大,可知 707 nm 耦合光对应的 EIT 窗口线宽为 10 MHz,679 nm 耦合光对应的 EIT 窗口线宽为 7.0 MHz。MOT 中存在多种激光,发生功率展宽、碰撞展宽以及多普勒展宽等,导致所测得的线宽值与实际值存在一定误差。

与文献[11]的实验结果相比,图 5 中的 EIT 线形窗口较浅。这主要是因为文献[11]中低能级采用基态能级作为研究对象,而本文选用低能级为激发态,寿命较短,直接导致 EIT 窗口深度较浅。下一步可调整耦合光与抽运光的功率强度来增加窗口深度。

图 6 所示为 679 nm 耦合光失谐 5 MHz、707 nm 耦合光失谐不同时对应的吸收曲线。图 6(a)对应 707 nm 耦合光失谐 -5 MHz 的情况,图 6(b)对应 707 nm 耦合光失谐 -10 MHz 的情况。

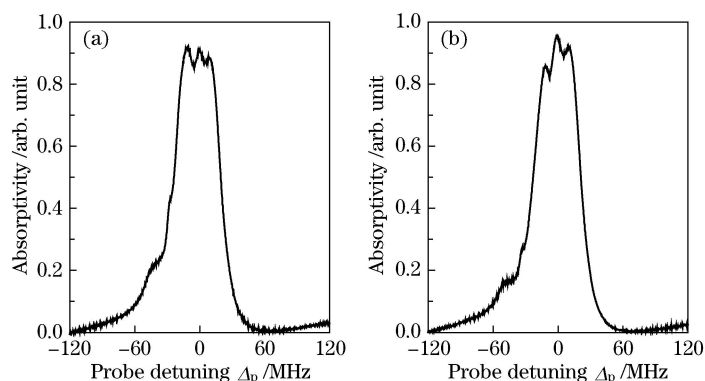


图 6 $\Delta_{c1} = 5$ MHz、 Δ_{c2} 不同时探测光吸收随探测光失谐的变化。(a) $\Delta_{c2} = -5$ MHz; (b) $\Delta_{c2} = -10$ MHz

Fig. 6 Variance of probe absorption with probe detuning under different Δ_{c2} when $\Delta_{c1} = 5$ MHz.

(a) $\Delta_{c2} = -5$ MHz; (b) $\Delta_{c2} = -10$ MHz

当 707 nm 耦合光失谐 $\Delta_{c2} = -5$ MHz 时,707 nm 和 679 nm 耦合光的 EIT 窗口线宽分别为 10.0 Hz 和 7.0 Hz;当 $\Delta_{c2} = -10$ MHz 时,707 nm 和 679 nm 耦合光的 EIT 窗口线宽分别为 7.2 Hz 和 6.9 Hz。调节 707 nm 耦合光的失谐只影响 707 nm 耦合光所形成的 EIT 窗口的位置及深度,对 679 nm 耦合光所产生的 EIT 窗口基本没有影响,两 EIT 系统虽然共用一个探测场跃迁,却相互独立。

5 结 论

实验观测到了铯冷原子三重态双耦合场下伞型结构的 EIT 现象,其结构可视为由两个单独的三能级 Λ 型结构构成,并由单重态与三重态间 $(5s^2)^1S_0 - (5s5p)^3P_1$ 互组跃迁作为抽运光来增加三重态上的原子布居数目。实验过程中,对 689 nm 抽运激光采用了线宽压窄和注入锁定技术,提高了三重态谱线的观测精度。分析了 EIT 窗口线宽,结果表明,该三重态双耦合场的 Λ 型 EIT 线形相互独立。下一步将在该研究的基础上,将 679 nm 及 707 nm 耦合光的相位进行关联,以观测原子相干现象,为三重态 EIT 效应的研究及应用提供更多参考。

参 考 文 献

- [1] Hahn K H, Field J E, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(22): 3062-3065.
- [2] Zhang Lei, Zhang Xiangyang. Study on high-precision atom localization via population in quasi- Λ -type four-level atomic system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112702.

- 张 蕾, 张向阳. 基于布居数探测的准 Λ 型四能级原子高精度局域化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112702.
- [3] Fry E S, Li X, Nikonov D, *et al.* Atomic coherence effects within the sodium D1 line: Lasing without inversion via population trapping[J]. Phys Rev Lett, 1993, 70(21): 3235-3238.
- [4] Vanier J, Levine M W, Janssen D, *et al.* Contrast and linewidth of the coherent population trapping transmission hyperfine resonance line in ^{87}Rb : Effect of optical pumping[J]. Phys Rev A, 2003, 67(6): 065801.
- [5] Harris S E, Field J E, Imamoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. Phys Rev Lett, 1990, 64(10): 1107-1110.
- [6] Imamolu A, Field J E, Harris S E. Lasers without inversion: A closed lifetime broadened system[J]. Phys Rev Lett, 1991, 66(9): 1154-1156.
- [7] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, *et al.* Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999, 397(6720): 594-598.
- [8] Ham B S, Shahriar M S, Kim M K, *et al.* Frequency-selective time-domain optical data storage by electromagnetically induced transparency in a rare-earth-doped solid[J]. Opt Lett, 1997, 22(24): 1849-1851.
- [9] Schmidt H, Campman K L, Gossard A C, *et al.* Tunneling induced transparency: Fano interference in intersubband transitions[J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(25): 3455.
- [10] Imamoğlu A, Bollor K J, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency[J]. Phys Rev Lett, 1991, 66(20): 2593-2596.
- [11] Kang H, Hernandez G, Zhang J, *et al.* Phase-controlled light switching at low light levels[J]. Phys Rev A, 2006, 73(1): 011802.
- [12] Abi-salloum T Y. Electromagnetically induced transparency and Autler-Townes splitting: Two similar but distinct phenomena in two categories of three-level atomic systems[J]. Phys Rev A, 2010, 81(5): 053836.
- [13] Wang Yebing, Cong Dongliang, Xu Peng, *et al.* Observation of atomic coherence in intercombination transition line of strontium atom[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0427001.
王叶兵, 丛东亮, 许 朋, 等. 铷原子互组跃迁中原子相干谱的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0427001.
- [14] Scully M O, Zubairy M S, Walmsley I A. Quantum optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 222.
- [15] Wang Yiqiu. Laser cooling and trapping of atoms[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 33-34.
王义遒. 原子的激光冷却与陷阱[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 33-34.
- [16] Tian Xiao. Experimental study on loading ^{88}Sr into an optical lattice and probing its clock transition[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2015: 29.
田 晓. ^{88}Sr 光晶格装载及钟跃迁探测的实验研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015: 29.
- [17] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Appl Phys B, 1983, 31(2): 97-105.
- [18] Li Y, Lin Y G, Zhao Y, *et al.* Stable narrow linewidth 689 nm diode laser for the second stage cooling and trapping of strontium atoms[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(7): 074208.
- [19] Liu Hui. Research of laser techniques and spectroscopy detection for strontium optical lattice clock[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2015: 16.
刘 辉. 应用于铷光钟的激光技术及光谱探测研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015: 16.
- [20] Lang R. Injection locking properties of a semiconductor laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1982, 18(6): 976-983.
- [21] Li Lin, Liu Peng, Ji Jingwei, *et al.* Probe laser power stabilization for the integrated sphere cold atomic clock[J]. Acta Optica Sinica, 36(8): 0814004.
李 琳, 刘 鹏, 吉经纬, 等. 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814004.