

文章编号: 1007-6654(2001)03-0135-04

铯饱和吸收光谱装置的简化设计及谱线的观测

常宏, 李利平, 张俊香

(山西大学量子光学教育部重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

摘要:介绍了一种铯原子饱和吸收光谱的简化装置。采用两镜腔型结构替代常规的四镜腔饱和吸收光谱装置, 观测到稳定的铯原子 D_2 线的超精细谱线, 为激光频率稳定于铯原子的吸收峰奠定了较好的基础。并对简化后的实验方案与常规的饱和吸收光谱方案进行了比较。

关键词:饱和吸收; 多普勒背景; 超精细谱

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

饱和吸收光谱技术^[1]是一种在原子汽室中直接获得消除多普勒增宽的简便激光光谱方法, 它是一种高分辨率光谱, 广泛应用于激光频率标准^[2], 激光冷却^[3]等方面。

这种技术最早是在七十年代由 T. W. Hansh 研究组在研究碱金属原子 D_2 线的吸收光谱时提出并实现的^[4]。饱和吸收光谱技术有效的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。实际上它并不是由饱和效应引起的, 是一种速度选择光抽运效应的表现。其基本物理原理是将传播方向相反而路径基本重合的两束光(泵浦光与探测光)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, 由于相对较强的泵浦光使这部分原子在基态的数目减少, 所以对探测光的吸收减少, 因而谱线呈吸收减

弱的尖峰即超精细跃迁峰。

近年来, 由于铯 D_2 线波长范围的窄线宽半导体激光器在原子冷却和囚禁^[5]以及减慢^[6]和超光速实验^[7]中的广泛应用, 使得铯饱和吸收光谱^[8-10]也受到研究者的普遍关注。由于铯原子基态($6^2S_{1/2}$)之间 $F=3, F=4$ 的频率间距为 9.2GHz, 而激发态($6^2P_{3/2}$) $F'=2, 3, 4, 5$ 间距约为一二百 MHz, 而室温下多普勒加宽为 500MHz, 当采用一束探测光穿过铯原子汽室, D_2 线吸收谱为两个中心频率相距 9.2GHz, 分别对应于 $F=3 \rightarrow F'=2, 3, 4$ 和 $F=4 \rightarrow F'=3, 4, 5$ 跃迁的两个频率加宽为 500MHz 的吸收峰, 多普勒加宽已将超精细的跃迁信号全部淹没, 因此必须通过饱和吸收光谱技术实现对超精细吸收谱线的探测。常规的饱和吸收光谱装置是采用四镜腔型结构^[8]使泵浦光和探测光的光路重合同时传播方向又相反。本实验是采用了二镜腔型结构, 简化了饱和吸收光谱装置, 从而提高了超精细吸收谱线的稳定度, 有利于更好的实现激光频率在吸收谱线上的稳频。同时还将

收稿日期: 2001-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(No:69837010); 海外杰出青年基金(No:69928504)。

作者简介: 常宏(1977-), 男, 山西大学光电研究所硕士研究生, 从事量子光学、激光技术等方面的研究。

对改进后的装置与常规的饱和吸收光谱装置进行了比较,分析了两种装置的优劣之处。

本文主要对铯原子 D₂ 线的超精细能级进行探测,其能级结构如图 1 所示:

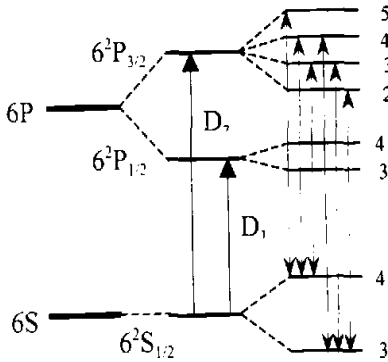


图 1 铯原子 D₂ 与 D₁ 线超精细能级图

铯原子的基态为精细能级 6²S_{1/2}, 与其相邻的激发态有 6²P_{1/2} 和 6²P_{3/2}, 其中 6²S_{1/2} 到 6²P_{1/2} 的跃迁谱线称为 D₁ 线, 中心波长约为 894.35nm; 由 6²S_{1/2} 到 6²P_{3/2} 的跃迁谱线称为 D₂ 线, 中心波长约为 852.12nm. 考虑铯原子的核自旋 7/2 后上述的精细能级分裂为相应的超精细能级如图 1 示. 实验中, 所涉及的超精细跃迁是 6²S_{1/2}, F=4→6²P_{3/2}, F'=3, 4, 5 和 F=3→6²P_{3/2}, F'=2, 3, 4.

图 2 为实验中简化的饱和吸收光谱装置, 使用光栅反馈压窄线宽的半导体激光器作为光源 (Model: DL-100), 其线宽小于 2MHz, 输出光在铯原

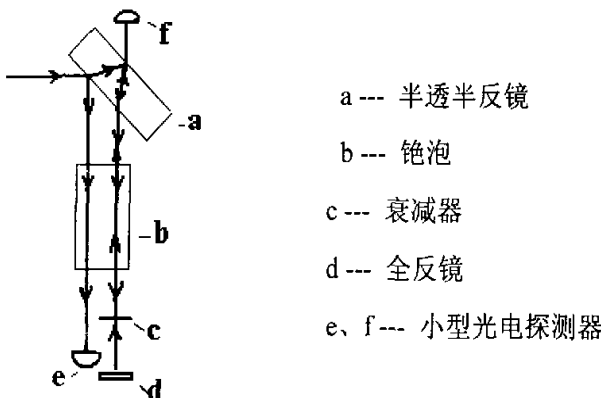


图 2 饱和吸收光谱简化装置

子 D₂ 线附近连续扫描, 并经过偏振棱镜转化为较纯的线偏振光, 偏振光经半透半反镜 a 后的两束平行反射光, 一束作为参考光、另一束作为泵浦光, 两者平行经过铯原子汽室后, 参考光束到达一个光电二极管上, 泵浦光被一反射镜反射后, 经过衰减器沿原路透过汽室, 又到达半透半反镜, 其透射光作为探测光到达光电二极管上. 当激光连续扫描经过铯原子 D₂ 线时, 光电二极管接收到的参考光信号具有多普勒吸收大背景, 同时探测器接收到的探测光是带多普勒背景的饱和吸收光谱信号. 将两探测器上的光电流信号相减, 放大处理后接入示波器上便得到饱和吸收光谱谱线. 整个装置一体化安装在一块稳固的大理石板上, 以尽可能减少外界震动对系统稳定性的影响. 图 3 与图 4 即为所得到由 6²S_{1/2}, F=3 到 6²P_{3/2}, F'=2, 3, 4 以及由 6²S_{1/2}, F=4 到 6²P_{3/2}, F'=3, 4, 5 的两套谱线, 谱线包括六条吸收峰, 六条峰中有三条峰对应于超精细跃迁如以 F=4 的饱和吸收谱线为例即是对应于 F=4↔F'=3, F=4↔F'=4, F=4↔F'=5 的跃迁, 称为主线. 而另外三个共振吸收峰频率对应处于两个超精细跃迁频率中间, 对应于 F=4↔F'=3, 4, F=4↔F'=3, 5, F=4↔F'=4, 5, 称为交叉线.

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), 而是一种速度选择机制, 六个共振吸收峰产生机制分析如下: 由于装置中的泵浦光与探测光方向相反, 根据多普勒效应, 当激光频率扫到某一对超精细能级的共振频率处时, 只有在速度为

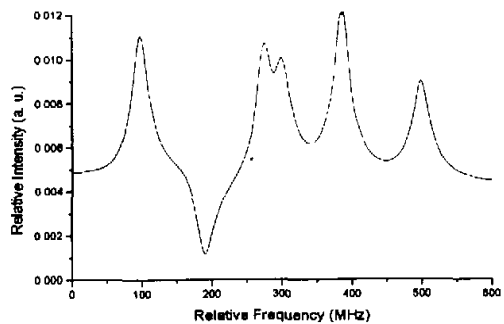


图 3 F=3 的饱和吸收光谱

(铯泡与外界杂散磁场通过 μ-metal 隔离)

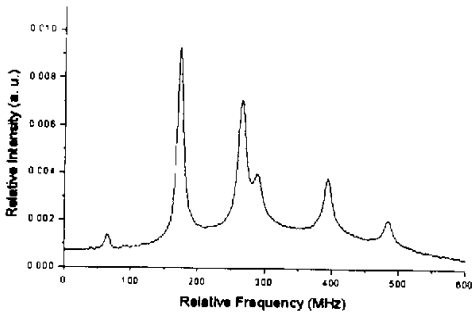


图4 F=4的饱和吸收光谱

零或在光矢方向速度分量为零的原子处才能与探测光和泵浦光频率共振(即三者频率一样)。较强的泵浦光通过抽运使基态的原子减少,从而使得原子对反向的探测光吸收减少,以致谱线出现吸收减弱的波峰,这便是三条主要成因。又由于光矢方向原子速度有一定分布,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,在泵浦光抽运下,基态原子减少。从而使反方向的探测光吸收减少,从而出现三条交叉峰。

此饱和吸收光谱装置是在常规的饱和吸收装置基础上加以改进的,光路中少了一个半透半反镜和一个反射镜。二者的理论原理是一致的,都是将光分为三束:参考光、探测光、泵浦光来进行工作的。但简化后的装置中光学元件相对减少,其结构大大

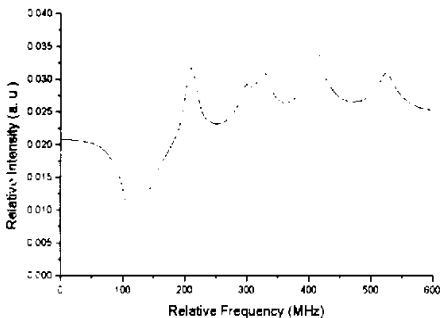


图6 F=3的饱和吸收光谱

(探测光与泵浦光偏振方向具有一定角度)

简化,因而提高了装置的稳定性,同时由于两探测器分别在光路的两侧,克服了常规装置中探测器需要紧凑放置的问题,给探测也提供了方便。也为进行激光与原子相互作用的研究如铯原子冷却、铯原子的电磁感应透明及光速在原子中传播速度的减慢及增大带来了稳频方面有利的频率稳定条件。

另外,实验中饱和吸收光谱尤其是F=3谱线的形状与外界磁场,泵浦光强度以及偏振等因素有关。在外界横向磁场作用强度逐步增加时,其 $6^2S_{1/2}, F=3$ 到 $6^2P_{3/2}, F'=2,3$ 的交叉线由无磁场时的向下转变为向上,峰值高度也逐步增加,之后又变为向下。相应的 $6^2S_{1/2}, F=3$ 到 $6^2P_{3/2}, F'=2$ 的谱线在探测光与泵浦光偏振方向改变的过程中,峰值高度会逐步降低并转变为反向,其反向高度也再增加,在反向向下的同时其 $6^2S_{1/2}, F=3$ 到 $6^2P_{3/2}, F'=2,3$ 的交叉线又会变反向上,如图5、图6、图7。

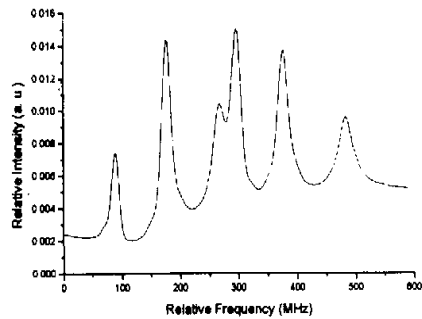


图5 F=3的饱和吸收光谱

(外界磁场作用于铯泡)

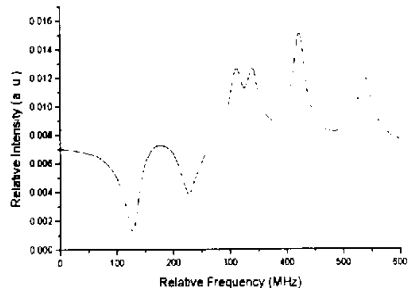


图7 F=3的饱和吸收光谱

(探测光与泵浦光偏振方向正交)

本文以外腔反馈窄线宽半导体激光器为光源研究了铯原子的饱和吸收光谱,对谱线进行了相应的实验观测,并对光场偏振等因素对谱线形状的影响也进行了观测。采用二镜腔型饱和吸收装置,使结构更加紧凑、一体化,从而提高了饱和吸收光谱的稳定性、实验操作的简易性。

参考文献:

- [1] LETOKOV V S, CHEBOTAY V P. Nonlinear Laser Spectroscopy [M]. Spinger - Verlag, Berlin: *Spinger Series in Optics Sciences*, 1977.
- [2] GOLDSMITH J F, WEBER E W, HANSCH T W. New Measurement of the Rydberg Constant Using Polarization Spectroscopy of H_{α} [J]. *Phys Rev Lett*, 1978, **41**: 1525 - 1528.
- [3] SALOMON C, DALIBARD J, PHILIPS W D, CLAIRON A, GUELLATI S. Laser cooling of Cesium atoms below $3\mu k$ [J]. *Europhys Lett*, 1990, **12**: 683 - 688.
- [4] 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.
- [5] 王军民, 张天才. 采用原子汽室磁光阱技术实现铯原子的激光冷却与俘获 [J]. *光学学报*, 1998, **18**: 1770 - 1771.
- [6] MARANGOS J. Slow Light in Cool Atoms [J]. *Nature*, 1999, **397**: 559 - 560.
- [7] WANG L J, KUZMICH A, DOGARIV A. Gain - assisted superluminal light propagation [J]. *Nature*, 2000, **406**: 277 - 279.
- [8] 王军民. 铯原子汽室磁光阱装置的建立及激光冷却与俘获铯原子的实验研究 [D]. 太原: 山西大学博士学位论文, 1999.
- [9] 李义民. 用磁光阱捕获与冷却铯原子的理论和实验研究 [D]. 北京: 北京大学博士学位论文, 1996.
- [10] 甘建华. 用稳频窄线宽半导体激光器直接冷却原子气体 [D]. 北京: 北京大学博士学位论文, 1996.

Simplification of Cs Saturated - absorption Spectroscopy Setup and its Spectra Observation

CHANG Hong, LI Li - ping, ZHANG Jun - xiang

(The Key laboratory of quantum optics, Ministry of Education, China; Institute of Opto - electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A simplified device for cesium saturation spectroscopy is introduced. A stable cesium D2 - saturation spectra is observed with this simplified setup instead of using the standard saturated absorption spectroscopy. The comparison between two configuration for Saturated - absorption Spectroscopy is also made.

Key words: scaturated - absorption; background of doppler; hyperfine