

中等输出激光功率且位相锁定的大频差双色激光系统

梁强兵,刘婷婷,刁文婷,刘智,何军,王军民[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西大学 光电研究所,山西 太原 030006)

摘要:介绍了两种用于实现中等输出激光功率且位相锁定的大频差激光系统的实验方案及典型结果.其中,基于分布反馈式(DFB)半导体激光器具有的较高的边模抑制比所导致的单模运转特性,文章采用光学注入锁定方法在实验中实现了两束波长为 852 nm、位相锁定且频差为 9.2 GHz(对应于铯原子基态超精细分裂)的中等输出激光功率(~ 150 mW)双色激光.拍频测量结果表明二者的相对线宽约 1 Hz(受限于所用频谱分析仪的分辨带宽).此外,在充有 20 Torr 缓冲气体氛并将剩磁屏蔽至约 20 nT 的铯原子气室中,采用该激光系统,在实验中观察到了线宽约 12.3 kHz 的相干布居俘获(CPT)信号.

关键词:位相锁定的双色激光;光学注入锁定;相干布居俘获;相对线宽

中图分类号:O431 **文献标志码:**A

0 引言

光场与原子相互作用过程中的原子相干效应得到越来越广泛的应用.早期相关的研究和应用主要是相干布居俘获(CPT)^[1]、电磁诱导透明(EIT)^[2]、受激 Raman 绝热输运(STIRAP)^[3]以及原子的 Raman 边带冷却^[4]等.近年来,量子存储器^[5]作为量子信息和量子计算的关键器件之一,逐渐成为研究的热点.迄今人们已经发展了多种形式的量子存储器,其中基于原子相干效应的量子存储器成为一个重要的发展方向.光子在原子系综内的存储,常用的方案中有的基于 EIT 效应^[2],有的是基于 DLCZ 方案^[6]中用到的自发 Raman 散射过程,还有的则是基于大失谐 Raman 过程^[7].这些方案的实现都需要用到位相锁定的大频差双色激光系统.此外,两束位相锁定的大频差双色激光系统还可用于原子及离子内态的相干操控^[8-9].迄今,为了适应不同实验方案的需要,人们相继发展多种不同的技术方法来获得两束位相锁定的大频差双色激光^[10-13].

2012 年本小组利用先射频调制激光二极管的注入电流然后光学注入锁定调制边带的方案实现了中等输出激光功率且位相锁定的频差为 9.2 GHz(对应于铯原子基态超精细分裂)的双色激光系统^[14].利用该系统我们详细研究了相关参数对铯原子气室内的 CPT 信号的影响^[15],结果表明该系统很好的位相相干性不仅可以满足对铯原子内态的相干操控的需求,而且利用其双色激光的功率和频差均可灵活调节的优点,我们还将其用于实现更加紧凑的单原子磁光阱^[14].然而,由于它采用注入锁定从激光器的调制边带的方式,从激光器的输出光中不可避免地含有较强的边带成分.若用在基于大失谐 Raman 过程的量子存储实验中,还需设计特定自由光谱区、高抑制比的光学标准具对激光频率成分进行过滤^[7].为了简化系统,基于分布反馈式(DFB)半导体激光器具有的较高的边模抑制比以及所导致的单模运转特性^[16-17],我们利用高频调制的位相型电光调制器(EOM)和光学注入锁定的方法,实现了另一套中等输出激光功率且位相锁定的大频差双色激光系统.

本文中,我们利用两台 DFB 激光器分别作为主激光器和从激光器.频率可调的主激光穿过高频调制的

收稿日期:2012-12-26; **修回日期:**2013-03-24

基金项目:国家自然科学基金(61078051;11274213;61205215);国家自然科学基金-国家重大科研仪器设备研制专项(612279002);国家重大科学研究计划课题(2012CB921601);山西省回国留学人员科研经费项目(2012-015);太原市科技明星专项

作者简介:梁强兵(1981-),男,山西离石人,博士研究生,研究领域:量子光学、相干光谱及冷原子物理.†通讯作者:E-mail:wwjjmm@sxu.edu.cn

位相型 EOM 后经位相调制产生 ~ 9.2 GHz 的正负一级边带,然后将负一级边带注入从激光器中以实现光学注入锁定.通过控制注入光参数及从激光的温度和电流,即可实现从激光器相对于主激光的负一级边带的稳定跟随,从而获得两束波长为 852 nm、频差为铯原子基态超精细分裂(9.19 GHz)且位相锁定的中等输出激光功率(~ 150 mW)的双色激光.1997年,法国 Clairon 小组^[10]研究了类似的实验方案,为了有效抑制从激光器输出光束中另外两个不必要的光频成分,他们采用了锁定的 F-P 腔进行滤波.2003年,韩国的 Ho Seong Lee 等人^[11]采用分布布拉格反射式(DBR)激光器实现了类似的激光系统.相比于 DBR 激光器,DFB 激光器具有更高的边模抑制能力^[16-17],其单模运转特性更好,故可作为天然的高边带抑制比的滤波器使用,使得上述激光系统得到大大简化.我们在实验中通过拍频测得主从激光间的相对线宽约 1 Hz(受限于所用频谱分析仪的分辨带宽);此外,在充有 20 Torr 缓冲气体氖(Ne)并将剩磁屏蔽至约 20 nT 的铯原子气室中,采用该激光系统我们在实验中观察到了线宽 ~ 12.3 kHz 的 CPT 信号.结果均表明,我们所实现的激光系统具有优良的位相相干性.

1 原理及实验装置

通过下述两种方案,我们都获得了可长时间稳定工作的、中等输出功率的、大频差且位相锁定的双色激光.图 1(a)为本小组之前采用的先射频调制注入电流然后光学注入锁定从激光器边带的方案示意图.实验中自制的 852 nm 光栅外腔半导体激光器作为主激光器,典型的输出功率和线宽分别为 70 mW 和 500 kHz (50 ms).另一个单模 GaAlAs 半导体激光管作为从激光器(标称功率为 100 mW).通过 Bias-T (Picosecond Pulse Labs 5547)可直接对从激光器电流进行 9.192 GHz 的射频调制(正一级调制边带约占从激光器总功率的 2%).通过调节从激光器的注入电流,可使其正一级边带被主激光器注入锁定.此时,从激光器的主模也随之与主激光器实现位相锁定并稳定跟随.具体细节可参考文献[14-15].图 1(b)为本文所采用的方案示意图.与图 1(a)比较可以发现,本方案中主要的不同在于 9.2 GHz 的射频调制对两个 DFB 激光器(~ 150 mW)没有直接的影响.块状位相型 EOM 使透射的主激光产生频差为 9.2 GHz 的正负一级边带.通过改变从激光器的注入电流和温度可使其分别被注入锁定跟随到注入光的主模或任一边带上,从而实现稳定的高边模抑制的单频输出.

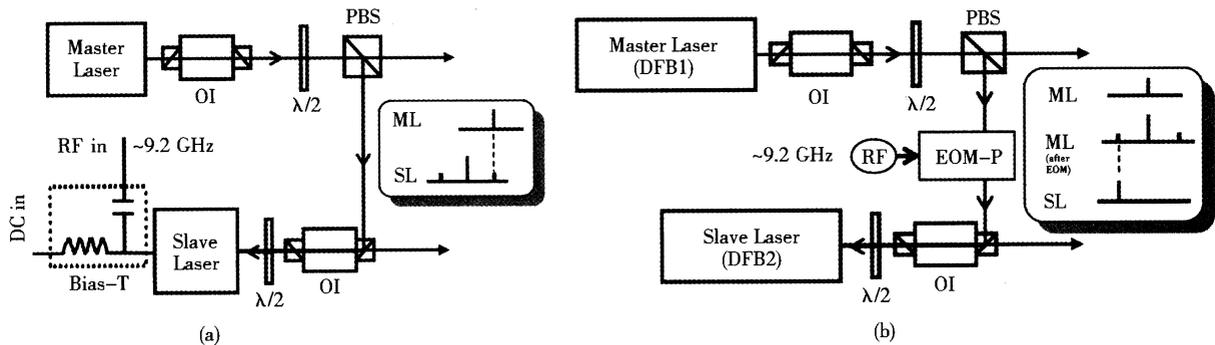


图 1 (a) 我们之前采用的先射频调制注入电流然后光学注入锁定从激光器(SL)正一级边带的方案示意图.(b) 本文采用的方案示意图,其中主激光(ML)经块状位相调制器(EOM-P)后光学注入从激光器内,通过调节从激光器的注入电流可使其被 ML 的负一级边带注入锁定.图(a)和图(b)中右下方框内的插图内对齐的竖线表示 SL 被 ML 注入锁定的频率成分.图中同时也给出完成注入锁定后 ML 和 SL 各自输出光的频率成分.

Fig. 1 (a) Schematic of our previous phase-locked laser source realized by RF modulation to the injection current of the slave laser (SL) whose +1-order side-band is injected by the master laser (ML). (b) Our present scheme: a portion of ML pass through the phase modulation EOM-P and then optically inject into the SL (DFB2) in which the injection current should be adjusted for the survival of the -1-order side-band of ML. The aligning line in right insert boxes in (a) and (b) shows the mode of SL controlled by the ML. The output light mode of the ML & SL in each scheme after optical injection is also labeled in figures.

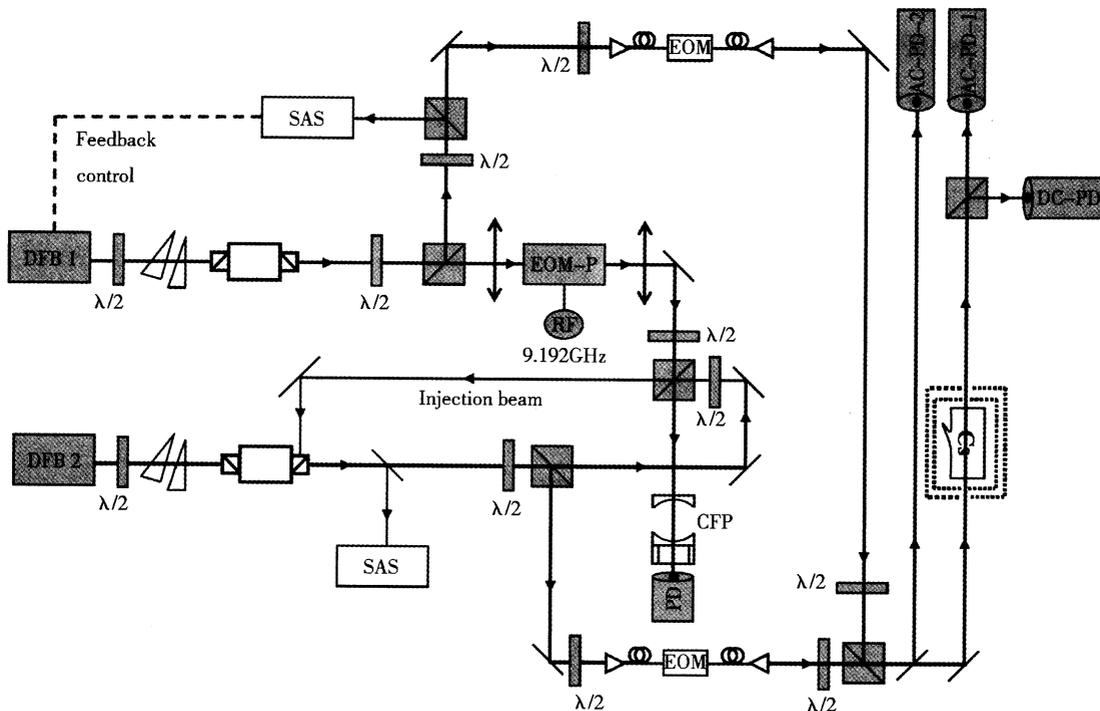


图2 实验装置详图. DFB1和DFB2分别为主激光器和从激光器. EOM-P为块状位相调制器. CFP为共焦F-P腔,可用于监视激光器的模式以及注入锁定情况. EOM为波导型强度调制,可使ML和SL的输出光分别工作在连续或不同形式的脉冲模式下. $\varnothing 25\text{ mm} \times L75\text{ mm}$ 的铯泡置于磁屏蔽筒内(剩磁 $\sim 20\text{ nT}$). AC-PD-1和AC-PD-2为交流探测器C5331, DC-PD为高增益的直流探测器(New Focus 2001). 图中DFB1可通过饱和吸收谱(SAS)锁定, DFB2的注入锁定情况可通过其SAS和CFP信号同时观测

Fig. 2 Experiment schematic setup in this letter. DFB1 and DFB2 are ML and SL, respectively. EOM-P is a bulk phase-type EOM; CFP is a confocal Fabry-Perot cavity, which can be used for monitoring the running mode of both lasers before and after optical injection. EOM is a waveguide type intensity modulation to make ML and SL working at different state of continue wave or burst pulse. Cesium vapor cell ($\varnothing 25\text{ mm} \times L75\text{ mm}$) inlayings in $\sim 20\text{ nT}$ residual magnetic field after proper shielding. AC-PD-1 and -2 are AC photo-detectors (C5331), and DC-PD is a high-gain DC photo-detector (New Focus 2001). As shown in picture, DFB1 can be locked to hyperfine transition line of the saturated absorption spectroscopy (SAS), and whether or not the DFB2 is injected can be observed by SAS and CFP

图2为本文所采用的实验装置详图. 为了获得可长时间稳定工作的较高输出功率的大频差且位相锁定的双色激光, 我们选择自由运转时单频特性更好的DFB激光器(Eagleyard)作为光源, 并选用精度较高的控温仪和电流源(ThorLabs ITC502)驱动自制的主激光器和从激光器. 寻找合适的工作温度后, 通过控制激光器的注入电流, 可以实现激光器在852 nm附近约0.7 nm范围内的连续频率调谐. 实验中, 通过观察饱和吸收谱(SAS)可以使DFB1的输出光在铯原子D2线 $6S_{1/2} F=3-6P_{3/2} F'=2, 3, 4$ 附近扫描或者锁定到某个跃迁线上. 主激光穿过被RF信号(Agilent E8257C)驱动的共振型高频位相调制器EOM(New Focus 4851M)后可产生 $\sim 9.2\text{ GHz}$ 的正负一级边带(用图2中CFP腔监测, 边带功率约为总功率的 $2 \times 15\%$). 基于DFB激光器具有的高边模抑制能力及所导致的单模运转特性, 我们将存在三种不同频率成分的主激光直接注入从激光器DFB2中. 通过控制注入光参数(光强、入射角度和偏振)及从激光DFB2的工作温度和电流, 即可实现从激光器相对于负一级边带的注入跟随. 如实验装置图所示, DFB2输出光分一部分与主激光一起进入共焦Fabry-Perot腔(CFP), 通过观察CFP的透射信号, 即可实现对两台激光器的频率以及后续对注入锁定情况的监视. 另外, 如装置图2所示, 我们也用SAS来同时观测DFB2的注入锁定情况. 当观察到如图3(a)(P199)所示的信号后, 利用RF频谱分析仪(Agilent E4405B)可以观察由快速探测器(New Focus 1554-B)获得的DFB1与DFB2之间的拍频信号, 结果如图4(P199)所示.

利用获得频差为铯原子基态超精细分裂间距(9.19 GHz)的两束位相锁定的中等功率输出的双色激光,

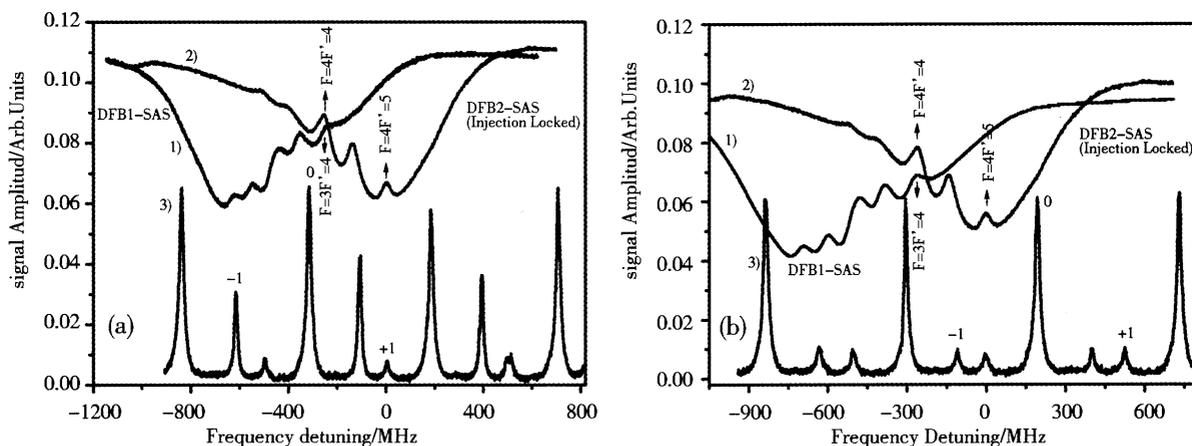


图3 SL被ML注入锁定时的情况.如图3(a)-(1)中的饱和吸收光谱DFB1-SAS所示,当主激光器DFB1工作在铯原子D2线的 $6S_{1/2} F=3-6P_{3/2} F'=2,3,4$ 附近时,DFB2在 $6S_{1/2} F=4-6P_{3/2} F'=3,4,5$ 附近约2 GHz范围可以稳定跟随扫描,如图3(a)-(2)中的饱和吸收光谱DFB2-SAS所示.对比DFB1-SAS与DFB2-SAS,可以发现二者频差正好对应于基态的超精细分裂.图3(a)-(3)表示当DFB2被注入锁定时,与图3(b)-(3)相比(挡住进入CFP腔的DFB2入射光),CFP透射信号中的负一级边带被从激光明显增强而载频和正一级边带则几乎没有变化,而且也没有其他的模式出现.

Fig. 3 SAS and the CFP transmission signal of the DFB2 after it has been optically injection-locked. When the DFB1 frequency scanning across the Cs $6S_{1/2} F=3-6P_{3/2} F'=2,3,4$ transitions as shown in (a)-(1), the slave laser DFB2 will be controlled by it and be scanned across the Cs $6S_{1/2} F=4-6P_{3/2} F'=3,4,5$ transitions, simultaneously, which can be see from (a)-(2). Compared to the (b)-(3) in which the input light of CFP from SL is blocked, the -1-order side-band of the transmission signal of CFP is enhanced famously while the carrier and +1-order side-band are almost not changed.

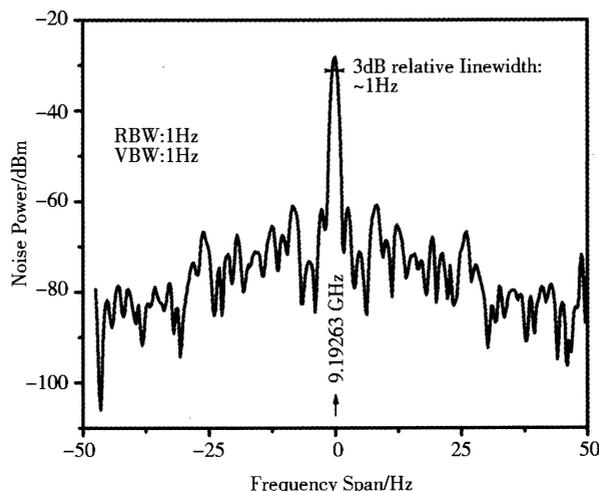


图4 注入锁定后DFB1与DFB2之间的拍频信号.通过射频频谱分析仪观察,拍频信号只出现在频率为9.19263 GHz处,当减小谱仪扫描范围至100 Hz时,相对线宽约1 Hz(受限于谱仪的分辨带宽).

Fig. 4 ML and SL Beat-note peak only appears at the frequency of 9.19263 GHz, and it shows a relative linewidth of ~ 1 Hz, which is limited by the resolution bandwidth (RBW) of the RF spectrum analyzer.

将二者分别经波导型振幅调制器(EOSpace)调制后可满足多种相关实验研究的要求,如CPT、连续光或脉冲光下的EIT及其相关的光减速和光存储、STIRAP过程以及对原子内态的相干操控等.当两个EOM都工作在恒定连续光输出模式下时,利用直流探测器DC-PD可以观察到不同条件下的CPT信号.另外,当同型号的两个EOM分别工作在高斯脉冲(DFB1频率锁定到 $6S_{1/2} F=3-6P_{3/2} F'=4$,作为信号光)和连续光(DFB2频率跟随到 $6S_{1/2} F=4-6P_{3/2} F'=4$,作为控制光)模式下时,通过比较两个APD探测器AC-PD-1&-2

(C5331)的信号,还可观察到 EIT 介质中的光减速现象.

2 实验结果及讨论

2.1 光学注入锁定及拍频测量

如实验装置所示,通过调节主激光器 DFB1 的注入电流并观察其 SAS 的方法,可使其工作在铯原子 D2 线的 $6S_{1/2}F=3-P_{3/2}F'=2,3,4$ 附近. 通过控制注入光参数(光强、入射角度和偏振)及 DFB2 的工作温度和电流,即可实现主激光器负一级边带对从激光器的光学注入锁定,如图 3(a)-(2)中 DFB2-SAS 谱所示. 从图中可以看到,当 DFB1 在 Cs 的 D2 线 $F=3-F'=2,3,4$ 跃迁附近扫描时,DFB2 在 Cs 的 D2 线 $F=4-F'=3,4,5$ 跃迁附近约 2 GHz 范围可以稳定跟随扫描. 注入锁定范围随着注入光强的增加而逐渐增大. 由于 DFB1 与 DFB2 合束后同时进入 CFP 腔,与注入锁定时的 CFP 透射信号图 3(b)-(3)(挡住 DFB2 进入 CFP 的光束)对比可以发现,图 3(a)-(3)(DFB1 和 DFB2 同时存在)中的负一级边带透射信号随注入光强的增加而变大,而正一级边带和载频处的透射峰强度则未发生明显变化. 上述结果表明 DFB2 已经被 DFB1 负一级边带注入锁定;且由于 DFB 很高的边模抑制比(>50 dB),在 DFB2 的 CFP 透射峰中几乎没有其他模式的干扰. 但是,实验中也发现,当注入总光强过高时,由于受 EOM 边带效率的限制,则反而会出现注入锁定范围缩小甚至剧烈跳模的现象.

我们用拍频的方法来测量 DFB1 与 DFB2 之间的相对线宽,结果如图 4 所示. 从中可以看出,独立运转时线宽约为 2 MHz 的两个 DFB 激光器经注入锁定后的相对线宽约 1 Hz(受限于谱仪的分辨带宽),表明二者之间已实现光学位相锁定,可以满足受激 Raman 跃迁等过程的要求.

2.2 大频差双色激光位相锁定的实验验证——相干布居俘获(CPT)

三能级 Λ 型原子中的 CPT 的物理基础是相干叠加暗态. 当与三能级 Λ 型原子相互耦合的两束光满足一定条件时,由于不同跃迁路径间的量子干涉使得原子被制备在相干叠加暗态上. 在双光子共振附近,原子介质对与之相互耦合的两束相干光场将变得透明,这同时也意味着原子介质光学特性的改变. 自 1976 年 Alzetta 等首先在钠原子光抽运实验中观察到 CPT 以来^[18],CPT 得到了广泛的研究和应用^[1],比如用于低于单个光子反冲极限的激光冷却^[4],高灵敏度的 CPT 原子磁强计^[19]以及 CPT 原子钟^[20]等. 尽管影响原子相干叠加暗态制备的因素有很多,如原子受到的碰撞、磁场、激光光强等^[15],但位相锁定的相干光场是其中的一个关键因素^[21]. 为了验证上述两束频差对应于铯原子基态超精细分裂的 DFB 激光器的位相锁定情况,我们在实验中用该激光系统在室温下铯原子气室中进行了 CPT 实验观测.

如实验装置图 2 所示,我们将 DFB1 频率锁定到铯 $6S_{1/2}F=3-6P_{3/2}F'=4$ 跃迁,作为信号光,DFB2 频率跟随到铯 $6S_{1/2}F=4-6P_{3/2}F'=4$ 跃迁,作为控制光,二者通过位相型 EOM 后共线同向穿过置于特制的坡莫合金磁屏蔽筒内(剩磁 ~ 20 nT)的室温下充有不同分压比的缓冲气体 Ne 的铯原子气室. 通过扫描位相型 EOM 的 RF 调制频率,可以使 DFB2 的输出光频率在 $6S_{1/2}F=4-6P_{3/2}F'=4$ 附近扫描. 利用图 2 中的直流探测器 DC-PD(New Focus 2001),可观察到控制光在原子介质内的透射的 CPT 信号. 同时,在利用上述系统获得的窄线宽的 EIT 介质中,通过比较两个相同型号的 APD 探测器 AC-PD-1 和 AC-PD-2 的信号,我们观察到了脉冲光减速现象. 在基本相同的条件下换用充有不同分压的缓冲气体 Ne 的铯原子气室,实验中发现,在充有 20 Torr Ne 的铯原子气室中的光减速现象最为明显. 目前,观察到的脉冲光延迟时间约 $3.3 \mu\text{s}$. 通过增加光斑面积、降低磁屏蔽筒内的剩磁,增加原子的光学厚度以及优化脉冲光参数等可进一步获得更加明显的光减速现象.

我们在相同的铯原子气室中获得了半高全宽(FWHM)约 12.3 kHz 的 CPT 信号,如图 5(a)(P201)所示. CPT 信号线宽仍较宽的原因,一方面是磁屏蔽筒内的残余磁场仍较强,导致 Zeeman 分裂^[15]. 另外,如图 5(b)所示,通过改变光强,我们还研究了 CPT 信号的半高全宽随控制光光强的变化关系. 图 5(b)中横轴是控制光光强与饱和吸收光强($I_s=1.12 \text{ mW}/\text{cm}^2$)的比值,其中考虑了高斯分布的控制光的实际测量值经介质吸收等损耗后的修正. CPT 信号线宽仍较宽的另一个原因是光强仍较大,导致强度展宽^[15]. 上述结果表明两束光之间具有很好的位相相干性,从而为后续开展基于单原子操控的触发式单光子源、原子系综内的量子存储奠定了基础.

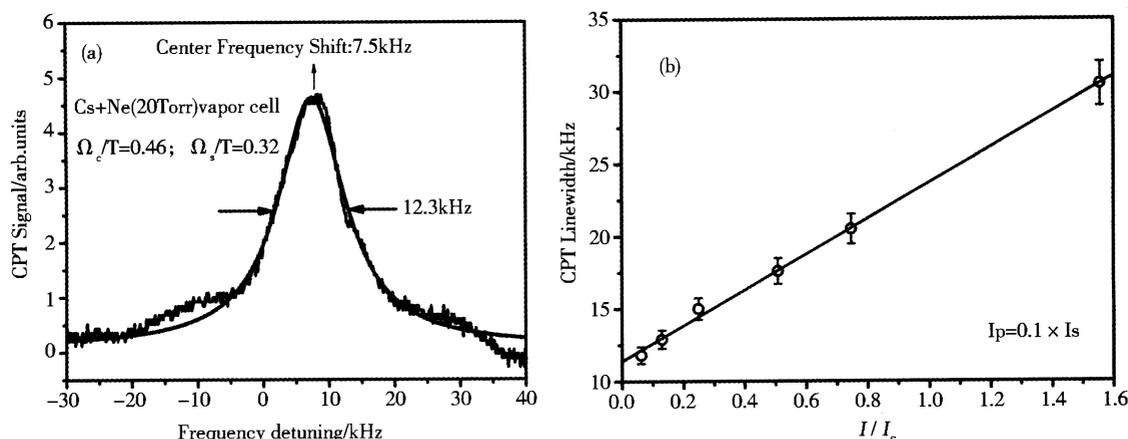


图5 (a) 在充有 20Torr 缓冲气体 Ne 的铯原子气室中,利用 DFB1(信号光)和 DFB2(控制光)获得的 CPT 信号.对 CPT 信号进行洛伦兹线型拟合可得其线宽最小约为 12.3 kHz,由于缓冲气体的影响,中心频率频移约为 7.5 kHz.(b)CPT 信号的线宽随控制光强变化的情况,空心圆点为实验结果,误差约 $\pm 2.5\%$,实线为线性拟合.实验中信号光强固定为 $0.1I_s$,其中 $I_s=1.12 \text{ mW/cm}^2$,为铯原子 D2 线的饱和光强.

Fig. 5 (a) CPT signal observed nearby the resonance of cesium atoms in room-temperature vapor cell (20 Torr neon buffer gas) with our phase-locked laser source. Without further optimized the experiment parameters, the minimum linewidth of the CPT we obtained presently is about 12.3 kHz, and its centre drifting away from the resonance is about 7.5 kHz mainly due to the buffer gas. As shown in (b), CPT linewidth increased linearly with the ratio of control light (DFB2) intensity and the saturation intensity I_s ($I_s=1.12 \text{ mW/cm}^2$), while the intensity of the signal light is fixed at $0.1I_s$.

3 结论

迄今,人们已发展了多种技术,包括经光学差拍探测后电子学反馈控制实现的光学相位锁定、光学注入锁定、AOM 频移后放大、注入电流调制后光学注入锁定以及以光学频率梳为参考的锁定等,用于产生大频差且光学位相锁定的双色激光系统以满足不同实验方案的要求.本文采用光学注入锁定的方法,采用 DFB 激光器实现了两束位相锁定的频差对应于铯原子基态超精细分裂(9.192 GHz)的中等功率输出($\sim 150 \text{ mW}$)的激光系统.拍频结果及 CPT 实验观察结果均表明,这种方案不仅操作灵活,而且性能稳定,可以满足对位相锁定以及双光子频率匹配要求严格的 Raman 跃迁等相干操控过程的需要.

尽管它没有经光学差拍探测后电子学反馈控制实现的光学相位锁定后大范围扫描的能力,但在共振型 EOM 所允许的范围内的扫描已经可以满足 CPT 和 EIT 等实验的要求,而且无锁频电子环路,从而避免了额外的电子学噪声引入.另外,该系统也不需要昂贵的高频段 AOM 及半导体锥型功率放大器就可产生较高功率并可独立控制和调制的位相锁定的激光.与我们之前发展的先调制注入电流然后光学注入锁定边带的方案相比^[14],尽管受共振型 EOM 调谐范围($<100\text{MHz}$)的限制,两台激光器之间的频差只能在 9.192 GHz 附近改变(可用非共振的集成波导型位相调制器,这样可实现与文献[14]中的方案大致相同的大范围改变频差的功能),但是由于前者高功率的射频调制信号直接加在激光二极管上,且边带调制效率较低,因而注入锁定范围会相对较小.

本文介绍的方案中,尽管方案出现较早,但我们通过选择边模抑制比较高($>50 \text{ dB}$)、中等输出激光功率、增益区内置光栅的 DFB 激光器作为激光光源(对外界振动不敏感),通过选择高精度的控温仪和电流源即可使激光系统长时间($>5 \text{ h}$)稳定地实现光学位相锁定,并且实现了高纯度的单频输出.另外,输出光的光强和脉冲形状均可独立控制,并可通过改变主激光器注入电流的方式来改变两束位相锁定、频差固定的输出光相对原子激发态的失谐.这种方案为我们后续开展基于大失谐 Raman 过程的量子存储以及基于单原子操控的单光子脉冲在原子相干介质中的量子存储奠定了实验基础^[7,22-23].

参考文献:

- [1] Wynands R, Nagel A. Invited Paper: Precision Spectroscopy with Coherent Dark States [J]. *Appl Phys B*, 1999, **68**:1-25.
- [2] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically Induced Transparency; Optics in Coherent Media [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**:633-673.
- [3] Bergmann K, Theuer H, Shore B W. Coherent Population Transfer Among Quantum States of Atoms and Molecules [J]. *Rev Mod Phys*, 1998, **70**:1003-1025.
- [4] Kasevich M, Weiss D S, Riis E, et al. Atomic Velocity Selection Using Stimulated Raman Transitions [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **66**:2297-2300.
- [5] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W. Optical Quantum Memory [J]. *Nature Photon*, 2009, **3**:706-714.
- [6] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, et al. Long-distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. *Nature*, 2001, **414**:413-418.
- [7] Reim K F, Nunn J, Lorenz V O, et al. Towards High-speed Optical Quantum Memories [J]. *Nature Photon*, 2010, **4**:218-221.
- [8] Jones M P A, Beugnon J, Gaetan A, et al. Fast Quantum state Control of a Single Trapped Neutral Atom [J]. *Phys Rev A*, 2007, **75**:040301-1-4.
- [9] Haze S, Senokuchi Y, Yamazaki R, et al. Phase-locked Light Sources with Low-phase Noise for Manipulating Terahertz-separated Metastable States in $^{40}\text{Ca}^+$ [J]. *Appl Phys B*, 2010, **101**:547-552.
- [10] Szymaniec K, Ghezali S, Cagnet L, et al. Injection Locking of Diode Lasers to Frequency Modulated Source [J]. *Opt Commun*, 1997, **144**:50-54.
- [11] Park S E, Kwon T Y, Lee H S. Production of Raman Laser Beams Using Injection-locking Technique [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2003, **52**:277-279.
- [12] Höckel D, Scholz M, Benson O. Robust Phase-locked Diode Laser System for EIT Experiments in Cesium [J]. *Appl Phys B*, 2009, **94**:429-435.
- [13] Unks B E, Proite N A, Yavuz D D. Generation of High-power Laser Light with Gigahertz Splitting [J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**:083108-1-4.
- [14] Diao W T, He J, Liu Z, et al. Alternative Laser System for Cesium Magneto-optical Trap Via Optical Injection Locking to Sideband of a 9-GHz Current-modulated Diode Laser [J]. *Opt Express*, 2012, **20**:7480-7487.
- [15] 刘智, 刁文婷, 王杰英, 等. 铯原子气室中相干布居俘获的参数依赖关系研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**:233201-1-10.
- [16] Ye C Y. Tunable External Cavity Diode Lasers; Tunable Semiconductor Diode Lasers [M]. Singapore: World Scientific, 2004:5-6.
- [17] Eagleyard Photonics GmbH. Distributed Feedback Laser[EB/OL]. [2007-11-23]. http://www.eagleyard.com/uploads/tx_tdo-product-Storage/EYP-DFB-0852-00150-1500-SOTO2-000-01.pdf.
- [18] Alzetta G, Gozzini A, Mol L, et al. An Experimental Method for the Observation of r. f. Transitions and Laser Beat Resonances in Oriented Na Vapour [J]. *Nuovo Cimento B*, 1976, **36**:5-20.
- [19] Scully M O, Fleischhauer M. High-sensitivity Magnetometer Based on Index-enhanced Media [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**:1360-1363.
- [20] Liu G B, Zhao F, Gu S H. Study of a Low Power Dissipation Miniature Laser-pumped Rubidium Frequency Standard [J]. *Chinese Phys B*, 2009, **18**:3839-3843.
- [21] Scully M O, Zubairy M S. Quantum Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997, 224-226.
- [22] Höckel D, Benson O. Electromagnetically Induced Transparency in Cesium Vapor with Probe Pulses on the Single-photon Level [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**:153605-1-4.
- [23] He J, Yang B D, Zhang T C, et al. Efficient Extension of the Trapping Lifetime of Single Atoms in an Optical Tweezer by Laser Cooling [J]. *Phys Scr*, 2011, **84**:025302-1-6.

Generation of the Moderate-output-power, Phase-locked Two-color Lasers with Large Frequency Difference

LIANG Qiang-bing, LIU Ting-ting, DIAO Wen-ting, LIU Zhi, HE Jun, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices (Shanxi University),

and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We introduce two schemes for generation of the moderate-power phase-locked two-color lasers with large frequency difference. Thanks to the single mode running character of the distributed feedback (DFB) diode laser caused by its high side-mode suppression ratio, we realize two phase-locked lasers with moderate output power (~ 150 mW) and ~ 9.2 GHz frequency difference via optical injection locking between two DFB diode lasers. Beat-note measurement between these two lasers shows that the relative line width is about 1 Hz, which is limited by the resolution band-width of the RF spectrum analyzer. Utilizing our new phase-locked two-color lasers introduced in this paper, we observed the CPT signal with 12.3 kHz linewidth in a cesium vapor cell filled with 20 Torr neon as buffer gas under ~ 20 nT residual magnetic field after proper magnetic shielding.

Key words: phase-locked two-color lasers; optical injection locking; coherent population trapping; relative linewidth

作者文摘的编写

文摘是以提供文献内容梗概为目的、不加评论和补充解释,简要明确地记叙文献重要内容的独立短文。其基本要素包括研究的目的、方法、结果、结论,具有独立性和自明性。

- ①目的——研究、研制、调查等的前提、目的和任务所涉及的主题范围。
- ②方法——所用的原理、理论、条件、对象、材料、工艺、结构、手段、装备、程序等。
- ③结果——实验的、研究的结果、数据、被确定的关系,观察结果,得到的效果,性能等。
- ④结论——结果的分析、研究、比较、评价、应用,提出的问题,今后的课题,假设,启发,建议,预测等。
- ⑤其他有价值的重要信息。

文献可分为报道性文摘、报道/指示性文摘和指示性文摘,作者文摘一般要写成前两种,字数在400字左右为宜,且对结果、结论宜写得详细,并将列述的创新点表达出来。

摘要的作用:

文摘具有重要的引导价值。首先,摘要是影响文献被检索和引用的重要因素。其次摘要为读者快捷准确地了解论文的主要内容提供了方便。

编写文摘的注意事项:

- ①要客观如实地反映一次文献,切不可加进作者的主观见解、解释或评论。
- ②要着重反映新内容和作者特别强调的观点。
- ③要排除本学科领域已成常识的内容,不得简单重复题名和引言中已有的信息。
- ④要用第三人称写法,应采用“对……进行了研究”、“报告了……现状”、“进行了……调查”等记述方法。对一次文献的主题、内容、性质、水平做出客观、准确、简明的描述,要求结构严谨,层次分明,表达准确,言简意赅,没有歧义。书写要合乎语法、逻辑关系,要采用规范化的科学技术名词术语,对新术语、缩略语等在首次出现时应加以说明。
- ⑤文摘不用非公知公用的术语和符号,不用数学公式和化学结构式,不用引文和图表。