

LD 相对于铯原子超精细跃迁线的偏频锁定*

王军民 张天才 谢常德 彭 堃

(山西大学光电研究所 太原 030006)

提要 对于单纵模半导体激光器(LD),应用往返两次通过一个声光频移系统的方法,结合铯原子饱和吸收稳频技术,实现了激光频率相对于铯原子 D_2 线 $6^2S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F'=5)$ 超精细跃迁的偏频锁定。其特点是可通过调谐声光频移系统的工作频率方便地改变偏频量,而不需要对光路进行再调整。

关键词 偏频锁定,单纵模半导体激光器,声光频移器,饱和吸收光谱,铯原子超精细跃迁

1 引 言

原子、分子饱和吸收光谱技术在激光器稳频方面的应用,对于激光技术、高分辨光谱、原子/分子物理、量子光学、原子光学、计量等领域具有重要意义。其中,由于碱金属原子相对简单的能级结构,其饱和吸收光谱受到了人们更多的关注,碱金属原子也成为激光冷却与俘获较为集中的研究热点。

在激光冷却与俘获研究中,最基本的多普勒冷却机制要求冷却/俘获激光束的频率相对于被冷原子的冷却循环跃迁线负失谐(红移)锁定。在各研究小组的原子冷却与俘获实验系统中,各自采用了不同的方法来达到这一目的。文献[1]采用铯原子气室结合磁场线圈使冷却循环跃迁线产生塞曼移动,直接将 LD 的频率锁定在被红移后的冷却循环跃迁线上。由于铯原子选择反射光谱相对于对应的超精细跃迁线是红移的,因而采用铯原子选择反射光谱技术稳定 LD 频率可实现负失谐偏频锁定^[2],文献[2]指出选择反射光谱的红移特性可能在原子冷却中得到应用。文献[3]的原子俘获系统中,经铯原子饱和吸收稳频后的钛宝石激光器其输出光束直接单次通过一个声光频移器产生所需的频率移动,也实现了负失谐锁定。由于声光频移器的衍射角随工作频率变化,因而改变频移量时出射的一级衍射光束方向会发生变化,需对后续光路作相应的调整。在该方法中声光频移器的衍射效率直接影响激光输出功率利用率的大小,而声光器件的衍射效率一般在 60~90% 左右,因此该方法的激光输出功率利用率不太高。文献[4~6]的钠、铯及钾原子俘获系统中,用分束器从激光器输出中分出功率极小的一束光单次通过声光频移器用于饱和吸收稳频,也达到了负失谐锁定的目的。这种方法较文献[3]虽提高了激光器输出功率的利用率,降低了对声光器件衍射效率的要求,但仍存在改变偏频量时衍射光束移

* 国家自然科学基金(编号:19774039)和山西省青年科学基金(编号:971012)以及山西省归国留学人员科研经费资助项目。

动的问题。文献[7, 8]则将主激光器频率直接锁定在铯 D_2 线中某条超精细跃迁线上, 输出光束经往返两次通过一个声光频移器产生所需的频率移动, 之后注入次级 LD 实现注入锁定放大。这种方法具有可方便地改变偏频量而无需对光路再作调整的优点, 但主激光器的功率利用率很低; 文献[8]中采用了两级注入, 系统比较复杂。

结合文献[4~6]和[7, 8]的优点, 在我们的铯原子俘获系统中, 由用作冷却/俘获光源的 LD 输出中分出约 1% 功率的光, 往返两次通过一个声光频移系统, 再结合铯原子饱和吸收光谱装置用于稳频, 实现了相对于铯原子冷却循环跃迁线的负失谐偏频锁定, 成功地应用在磁光阱中实现了铯原子的激光冷却与俘获^[9, 10]。这种方法既具有可通过调谐声光频移器工作频率方便地改变偏频量而无需再对光路作调整的优点, 又相对提高了 LD 输出功率的利用率, 还降低了系统对声光器件衍射效率的要求。

2 基本原理

冷却与俘获激光频率相对于铯原子 $6^2S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F'=5)$ 超精细跃迁(冷却循环跃迁)的负失谐偏频锁定, 是激光冷却与俘获铯原子中最基本的多普勒冷却机制所必须的; 同时为了便于实验研究, 要求偏频量可在较大范围内调整。通过特定的方法造成一个相对于铯原子超精细跃迁线频率可移动的参考频率标准, 然后将激光频率锁定在频率标准上, 即可达到上述目的。

2.1 往返两次通过的声光频移系统

声光频移器一般采用布喇格衍射效应, 输出只出现 0 级和 +1 级(或 0 级和 -1 级)衍射光束, 相对于入射光频率 0 级光频率不变, +1 级光频率升高, -1 级光频率降低, 频率改变量等于声光频移器所加射频信号的频率 Ω , 在一定范围内改变射频信号的频率即相应地改变了频移量。由于衍射角 θ 与 Ω 有关, 当调谐 Ω 时会引起 θ 的变化, 即 +1 级(或 -1 级)光的出射方向将发生变化, 需对后续光路适当地作再调整。若将 -1 级光沿原路反射回去, 反向再次通过声光频移器(见图 1), 则新的 -1 级光将与入射光重合(传播方向相反), 其频率相对于入射光频率 ν_0 降低了 2Ω 。即使改变 Ω 引起 θ 的变化, 只要能设法保证 -1 级光沿原路返回, 则新的 -1 级光仍与入射光重合。

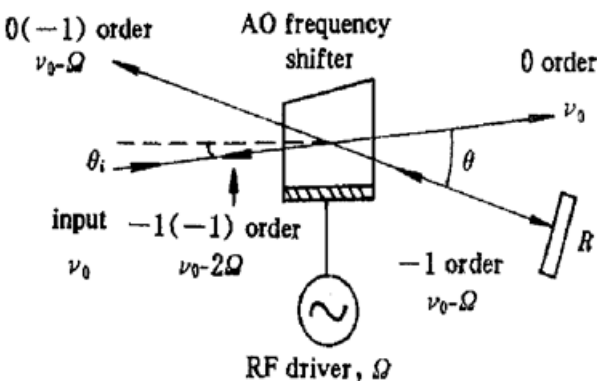


图 1 往返两次通过的声光频移器示意图
Fig. 1 Sketch of the double-pass acousto-optic frequency shifter

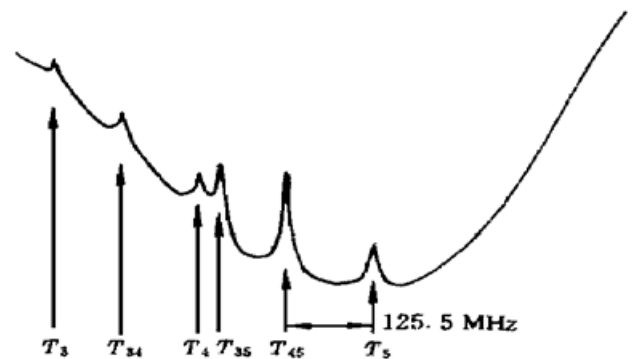


图 2 带多普勒大背景的铯原子饱和吸收光谱
Fig. 2 The saturated absorption spectrum of cesium with Doppler background
 $6^2S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F'=3, 4, 5)$

采用图 3 中虚线矩形框部分所示的光路, 在声光频移器前后各用一个透镜, 并使两个透镜共焦于声光频移器中心。前一透镜可将入射激光束聚焦以提高声光衍射效率, 后一透镜则可将 - 1 级衍射光束变换为平行于透镜轴线的光束, 然后正入射到一个反射镜原路返回。在改变 Ω 的情况下虽然引起了 θ 的变化, 但 - 1 级光经后一个透镜变换后仍然平行于透镜轴线, 所以仍可保证 - 1 级光被全反镜反射后沿原路返回。光路中的偏振分光棱镜和 $\lambda/4$ 波片, 可将经往返两次通过声光频移器频率降低了 2Ω 后的出射光束分离出来。

2.2 饱和吸收谱的相对移动

图 2 为铯原子 D_2 线中 $6^2S_{1/2}(F = 4) \rightarrow 6^2P_{3/2}(F' = 3, 4, 5)$ 的饱和吸收谱(未减掉多普勒大背景, 从左到右为频率升高的方向), T_3, T_4, T_5 分别对应 $F = 4 \rightarrow F' = 3, F' = 4, F' = 5$ 的超精细跃迁(T_5 为冷却循环跃迁), T_{34} 对应 $F = 4 \rightarrow F' = 3$ 和 $F' = 4$ 的交叉线, T_{35} 对应 $F = 4 \rightarrow F' = 3$ 和 $F' = 5$ 的交叉线, T_{45} 对应 $F = 4 \rightarrow F' = 4$ 和 $F' = 5$ 的交叉线。 T_{45} 与 T_5 之间的频率间隔为 125.5 MHz。

采用上述往返两次通过的声光频移系统, 将分出的用于饱和吸收稳频的光束频率降低 2Ω 。若用 ν_0 表示 LD 输出激光频率, 则经往返两次通过声光频移系统出射光的频率为 $\nu_0 - 2\Omega$ 。当 $\nu_0 - 2\Omega = \nu(T_{45})$ 时,

$$\nu_0 = \nu(T_{45}) + 2\Omega = [\nu(T_5) - 125.5 \text{ MHz}] + 2\Omega = \nu(T_5) - (125.5 \text{ MHz} - 2\Omega)$$

即激光器频率处在相对于 T_5 峰负失谐 $\Delta = 125.5 \text{ MHz} - 2\Omega$ 处, 改变 Ω 即可改变负失谐量。至于铯原子饱和吸收光谱稳频技术的原理本文则不再赘述。

3 实验装置及结果

实验中所使用的激光器为美国 SDL 公司生产的 SDL-TC40 型连续可调谐单频半导体激光器, 波长范围可覆盖铯原子 D_2 线(852.11 nm), 波长粗调范围约为 20 nm, 输出功率约为 500 mW, 输出激光线宽约为 200 kHz, 频率连续调谐范围约为 60 GHz。其注入电流外调制带宽为从 DC 到 100 kHz, 调制度约为 5.0 mA/V, 频率的电流调谐率约为 50 MHz/mA。实验装置示意图见图 3。

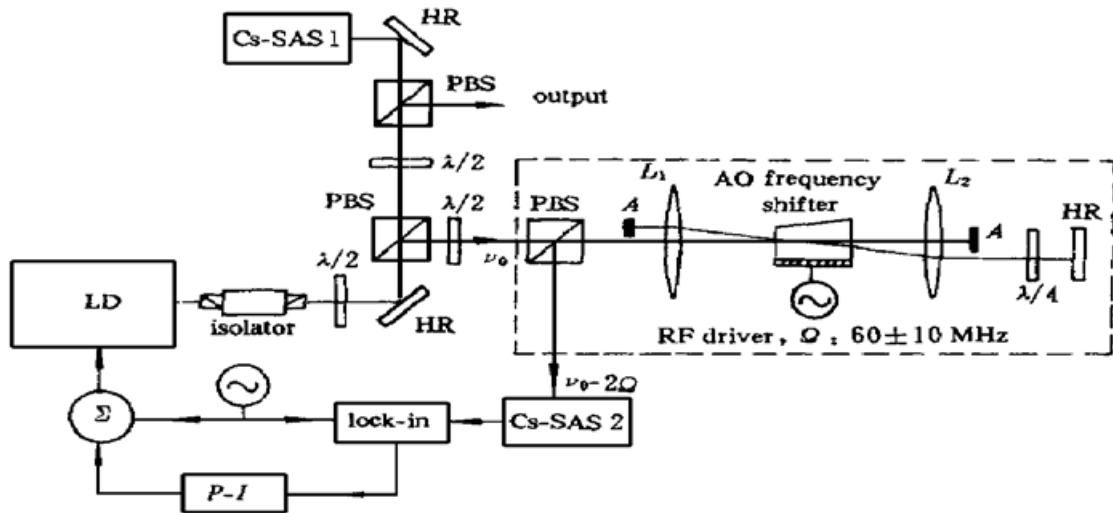


图 3 LD 偏频锁定实验装置示意图

Fig. 3 Block diagram of the experimental setup of the LD frequency-offset locking

LD 输出经过一个隔离度约为 40 dB 的光隔离器(LD 输出激光束在激光器内部已被准直),以消除光反馈的影响。经 $\lambda/2$ 波片、反射镜(HR)及偏振分光棱镜(PBS)分为两束:功率约 1% 的一束光往返两次通过声光频移系统,光频率被降低 2Ω 后入射到铯饱和吸收光谱装置 Cs-SAS2 中,用于 LD 稳频;另一束功率约 99% 的光束则经 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜(PBS)再分出约 1%,入射到铯饱和吸收光谱装置 Cs-SAS1 中用于监视未经频移的光频率,绝大部分功率(大于 LD 输出功率的 98%)可供铯原子磁光阱用作冷却与俘获光。用于监视激光模式的共焦扫描 F-P 腔和用于监视激光波长的波长计未画出。

实验中所使用的声光频移器(由一个输出功率为 1.2 W 的射频功率源驱动),其中心频率为 60 MHz,工作带宽约为 ± 10 MHz,对 852.11 nm 激光的透射率约为 95%,衍射效率约为 70%。实验中需细致地调节声光频移器的方位角,使入射光束以合适的角度入射,直到输出的一级光功率最大。关掉射频驱动源电源,一级光随之消失,通过这一点可确定出射的零级和一级光束,但此时还不能确定输出的一级光是+1 级还是-1 级。仔细调节后一个透镜的位置和角度,使一级光束通过透镜后尽量与零级光平行。通过旋转光路中的 $\lambda/4$ 波片,可使经反射镜原路反射回声光频移器而再次衍射出的新的一级光的偏振与入射光偏振垂直,从而可通过偏振分光棱镜将频移 2Ω 后的衍射光分离出来。通过锯齿波信号扫描 LD 注入电流以实现激光频率动态连续扫描。在一台双通道示波器上比较铯饱和吸收装置 Cs-SAS1 和 Cs-SAS2 得到饱和吸收谱,通过两套谱的相对位置,即可确定声光频移器出射的一级光是+1 级还是-1 级。

当声光频移器的工作频率为 $\Omega = 55.25$ MHz,且往返两次通过声光频移系统频率被降低了 2Ω 的出射光频率处在铯原子的 T_{45} 峰时(图 4 的 Cs-SAS2 谱线中虚线处),则未经频移的光束(图 4 的 Cs-SAS1 谱线)其频率处在相对于 T_5 峰负失谐 $\Delta = 15$ MHz(125.5 MHz - 2Ω)处。在铯原子磁光阱实验中,需要调节负失谐量时,只需调谐声光频移器的工作频率即可方便地达到改变负失谐量的目的,而无需对后续光路作再调整。如要求负失谐量为 25 MHz 时,只需将声光频移器工作频率调至 50.25 MHz 即可。图 5 是通过对 LD 注入电流进行调制,由饱和吸收装置 Cs-SAS2 的输出经锁相(Lock-in)同步检波获得的一阶微分信号,即鉴频曲线,对应的正弦调制信号频率约 15 kHz,调制信号幅度约 1 mV 左右。

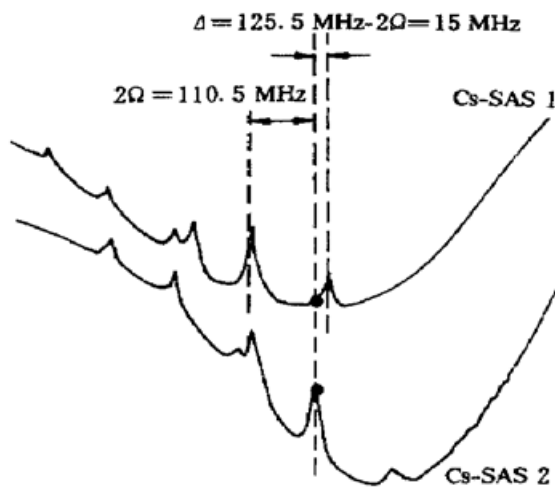


图 4 声光频移前后所记录到的饱和吸收光谱

Fig. 4 The saturated absorption spectra recorded without and with the acousto-optic frequency-shifting

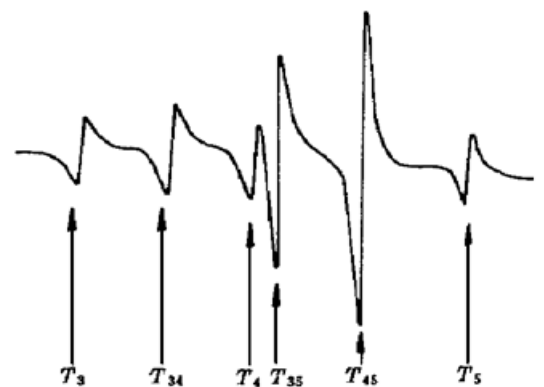


图 5 LD 偏频锁定的鉴频曲线

Fig. 5 The frequency-discriminated curve obtained from the saturated absorption spectra for LD frequency-offset locking

该激光器自由运转(开环)时,输出激光在 1 s 内的频率跳动(Frequency Jitter)小于 1 MHz。以图 5 中的 T_{45} 作为参考频率标准,在输出激光频率相对于铯原子冷却循环跃迁 T_5 负失谐量为 15 MHz(对应的声光频移器的工作频率为 $\Omega = 55.25$ MHz)时,将由锁相放大器输出的频率误差信号反相后经比例积分电路(P-I)通过 LD 的注入电流外调制端口反馈回 LD,以实现闭环锁定,即所谓的偏频锁定。闭环偏频锁定的初步结果为:在 1 s 内输出激光的频率稳定度约为 2×10^{-10} 。这一相对于铯原子 D_2 线中的冷却循环跃迁负失谐锁定的半导体激光系统使用在铯原子磁光阱装置中,已成功地实现了铯原子的激光冷却与俘获,获得了超冷铯原子团^[9]。

由于锁频环路的增益还不够高,比例积分电路的参数尚未优化,再加上所使用的声光频移器的射频驱动源的频率稳定度还不够高,均影响到激光频率的长期稳定度。从这几方面入手对激光稳频系统的改进工作正在进行之中,激光频率的长期稳定度可望得到进一步改善。

参 考 文 献

- 1 S. Grego, M. Colla, A. Fioretti *et al.*. A cesium magneto-optical trap for cold collisions studies. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(5, 6): 519~ 526
- 2 R. N. Li, S. T. Jia, R. Loe-Mie *et al.*. Novel simple schemes for the frequency stabilization of a laser diode onto an atomic transition. Editors: Wang Zhijiang, Zhang Zhiming, Wang Yuzhu. *Laser Spectroscopy* — International Conference (Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997): 108~ 110
- 3 L. Hilico, C. Fabre, E. Giacobino. Operation of a «gold-atom laser» in a magneto-optical trap. *Europhys Lett.*, 1992, **18**(8): 685~ 688
- 4 David S. Weiss, Erling Riis, Yaakov Shevy *et al.*. Optical molasses and multilevel atoms: experiment. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(11): 2072~ 2083
- 5 J. H. Marquardt, H. G. Robinson, L. Holleberg. Line shapes of cascade two-photon transitions in a cesium magneto-optic trap. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1384~ 1393
- 6 R. S. Williamson, P. A. Voytas, R. T. Newell *et al.*. A magneto-optical trap loaded from a pyramidal funnel. *Optics Express*, 1998, **3**(3): 111~ 117
- 7 Gan Jianhua, Li Yimin, Chen Xuzong *et al.*. Magneto-optical trap of cesium atoms. *Chinese Phys. Lett.* (中国物理快报), 1996, **13**(11): 821~ 824 (in Chinese)
- 8 Hou Jidong, Li Yimin, Yang Donghai *et al.*. An improved magneto-optical trap for cesium atoms. *Chinese Phys. Lett.* (中国物理快报), 1996, **15**(5): 335~ 337
- 9 Wang Junmin, Zhang Tiancai, Yang Weidong *et al.*. Cooling and trapping of cesium atoms using the technique of vapour cell magneto-optical trap. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12): 1770~ 1771 (in Chinese)
- 10 Wang Junmin, Zhang Tiancai, Yang Weidong *et al.*. Magneto-optical trap loaded from a ultrahigh-vacuum vapour cell of cesium atoms. *Acta Sinica Quantum Optica* (量子光学学报), 1998, **4**(4): 229~ 235

Frequency-offset Locking of LD to Hyperfine Transition of Cesium Atoms

Wang Junmin Zhang Tiancai Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006*)

Abstract Letting the beam doubly-pass an acousto-optic frequency-shifting system and using the technique of saturated absorption spectra of cesium atoms we realized the frequency-offset locking of a single-longitudinal-mode laser diode to the hyperfine transition of $6^2S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6^2P_{3/2} F' = 5$ of cesium atoms. The characteristic is that the detuning can be changed conveniently by tuning the working frequency of the acousto-optic frequency-shifter without readjusting the optical system.

Key words frequency-offset locking, single-longitudinal-mode semiconductor laser, acousto-optic frequency shifter, saturated absorption spectra, hyperfine transition of cesium atoms