

文章编号: 0253-2239(2001)05-0525-05

可调谐振幅压缩光的产生及其 在频率调制光谱中的应用*

王军民 贺凌翔 刘涛 张天才 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

摘要: 通过半导体激光器的注入锁定, 产生了频率可在铯原子 D_2 线附近(852.356 nm)连续调谐约 1 GHz 以上、压缩度约为 0.8 dB 的振幅压缩光; 将其应用在铯饱和蒸气样品的频率调制光谱的演示测量中, 信噪比较散粒噪声极限提高了约 0.7 dB。

关键词: 振幅压缩光场; 半导体激光器; 注入锁定; 频率调制光谱; 信噪比

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

1 引言

人们提出的各种光谱学方法和技术是认识原子(分子)体系性质的重要途径。通过光场与原子(分子)体系的相互作用过程, 可以对原子(分子)运动状态进行控制(如中性原子的激光冷却与俘获), 并产生特定统计性质的光场, 如正交相位压缩光场就是由 Slusher 等人采用钠原子蒸气中的光场, 通过四波混频过程于 1985 年在实验中首次产生的。迄今为止, 人们已经可以在实验中产生包括单模和双模正交相位压缩光场^[1-5]、振幅压缩(强度压缩)光场^[6-10]、强度差量子噪声低于标准量子极限的孪生光束^[4, 11-13]等在内的各种非经典光场, 并对非经典光场与原子体系的相互作用过程作了一些研究^[3, 5], 应用非经典光场进行光学测量^[1, 8-9, 12, 13], 突破了由散粒噪声极限所限制的测量信噪比。

近期, 我们通过半导体激光器的注入锁定, 获得了频率可在铯原子 D_2 线处连续调谐的振幅压缩光, 并将其作为探测光对铯饱和蒸气样品的频率调制光谱作了测量, 发现信噪比较散粒噪声极限提高约 0.7 dB。本文将介绍我们在这方面的工作进展。

2 频率可连续调谐的振幅压缩光场的产生

振幅压缩光场, 是一类典型的非经典光场, 其强

度噪声低于相应的散粒噪声基准(同样功率的相干态光场或热光场的强度噪声即为其散粒噪声基准)。半导体激光器中的振幅压缩是由 Yamamoto 等人于 1986 年预言^[14], 并于 1987 年在实验中首先实现的^[6]。经过十多年来的发展, 人们目前已可采用多种方式在恒流源驱动的半导体激光器中实现振幅压缩光场, 如低温环境^[15]、光栅外部反馈^[16-18]、平面镜反馈^[7]、注入锁定^[8, 9, 19]等。

实验中我们采用了半导体激光器注入锁定的方案, 通过注入光使被动激光器的边模受到进一步抑制, 从而由边模贡献的无规噪声也得到抑制, 最终导致被动激光器的噪声被抑制于散粒噪声基准之下。其实验装置示意图见图 1。主激光器(Master LD)采用 SDL-5702-H1 型 GaAlAs 分布布拉格反射式半导体激光器, 自由运转时其中心波长约 852 nm, 线宽约 3 MHz, 可方便地通过改变其注入电流实现频率连续调谐, 频率调谐范围可覆盖铯原子 D_2 线; 其强度噪声略高于相应的散粒噪声基准。被动激光器(Slave LD)采用 SDL-5411-G1 型 GaAlAs 半导体激光器, 自由运转时中心波长约 851 nm, 线宽约 15 MHz~20 MHz, 阈值电流 I_{th} 约 12 mA; 当 $I/I_{th} = 8.3$ 时, 其强度噪声在相应散粒噪声基准以上约 5 dB~10 dB。主激光器输出经准直透镜后, 采用一个隔离比约 40 dB 的隔离器以避免光反馈; 通过 $\lambda/2$ 波片和立方偏振棱镜 PBS₁ 组成的强度可调束器分出一部分, 经偏振棱镜 PBS₂ 反射反向经隔离器注入被动激光器。

* 国家自然科学基金(19774039, 69837010)和山西省青年科学基金(971012)资助项目。

收稿日期: 2000-01-12; 收到修改稿日期: 2000-03-20

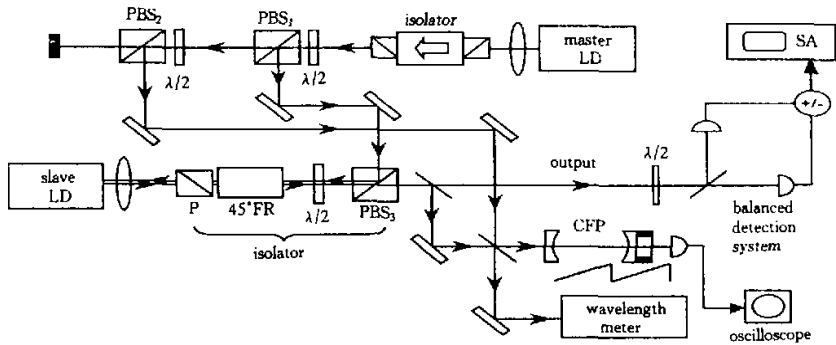


Fig. 1 Experimental setup for obtaining amplitude-squeezed light of LD by injection-locking

被动激光器的输出则经准直、隔离后入射到已校准的平衡探测系统中,测量其强度噪声,并与相应的散粒噪声基准作比较。平衡探测系统^[7,17,18]由二分之一波片、偏振分束器、两个对称的宽带的低噪声硅光电二极管探测放大器、射频加减法器及射频频谱分析仪(HP-8590L)组成。当两臂的光强平衡时,射频加减法器处在加的位置,由射频频谱分析仪记录被动激光器输出光的强度噪声功率;射频加减法器处在减的位置,则由射频频谱分析仪记录到的是相应的散粒噪声基准。散粒噪声基准事先需通过热光场反复仔细校准。

主激光器及被动激光器还通过分束器各自分出一小部分由同一个共焦扫描干涉仪(CFP)监视模式,由波长计交替测量二者的激光波长值。

实验中,首先通过调节主激光器的温度和注入电流将其频率调谐到铯原子 D_2 线 $6^2S_{1/2} F=4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F'=3, 4, 5$ 对应的多普勒吸收线中心(真空波长值约 852.356 nm),这一波长值可由置于光路中的饱和铯蒸气发出的荧光和在遮挡被动激光器光束时波长计的读数来确定。由共焦扫描干涉仪腔可观察主激光器和被动激光器二者的模式。仔细调节注入光路中的各元件,使主激光器分出的注入光束和被动激光器的输出光束重合,调节主激光器的准直透镜,尽量使其光斑在被动激光器处与被动激光器的光斑匹配。注意到图 1 中被动激光器前由格兰-泰勒棱镜 P、偏振面可旋转 45° 的法拉第旋转器 FR、 $\lambda/2$ 波片和偏振棱镜 PBS_3 所组成的隔离器,对于从 PBS_3 侧面入射的注入光而言损耗很小,且注入光反向通过隔离器后为 p 偏振,可正好与被动激光器的偏振相匹配;而对于来自该隔离器后面的反馈光,其损耗则极大,这样该隔离器既可允许注入光反向通过注入被动激光器,又可避免后方的光反馈对被动激光器的影响。通过被动激光器的温度和注

入电流调节其波长(频率)值,使之尽量接近主激光器,在二者的频率差小到一定的范围内时即可实现注入锁定。此时可观察到被动激光器和主激光器由其共焦扫描干涉仪腔打出的透射峰已重合在一起,在一定范围内调谐主激光器的频率时,被动激光器的频率也随之被调谐。但当在更大的范围内调谐主激光器频率时,被动激光器则会失锁。被动激光器注入锁定的频率范围的大小,与主激光器注入光的功率、注入光束的调整状态等因素密切相关。实验中在 852.356 nm 附近,在被动激光器的准直透镜前的注入光功率约 1.5 mW 时,测得被动激光器典型的注入锁定范围约为 1.7 GHz。

通过注入锁定,在 852.356 nm 处被动激光器可获得约 0.8 dB 的振幅压缩。实验中进一步采用低频三角波电压扫描主激光器的注入电流,使其频率可往返扫过铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F'=3, 4, 5$ 对应的多普勒吸收谱线(频率跨度大于 1 GHz),相应地被动激光器在注入锁定时其频率也随主激光器同步扫描。被动激光器保持约 0.8 dB 压缩度时的最大频率连续调谐范围约 1.7 GHz。图 2 为当

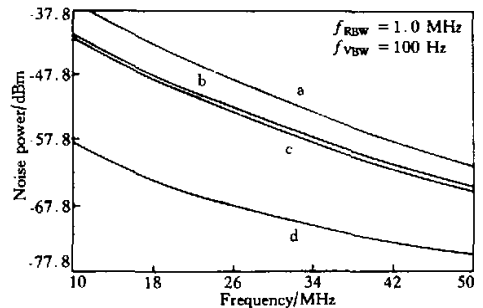


Fig. 2 Amplitude noise power spectrum of slave laser from 10MHz ~ 50MHz. a: without injection locking beam; b: the shot noise limit; c: with injection locking beam; d: the electronics noise of the system

$I/I_{th} = 8.3$ 时,被动激光器的频率扫过铯饱和和蒸气 $6^2S_{1/2} F = 4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F' = 3, 4, 5$ 对应的完整的多普勒吸收谱线时,通过平衡探测技术测得在 10 MHz ~ 50 MHz 范围内被动激光器在注入锁定时典型的强度噪声功率谱。图中分辨率带宽 f_{RBW} 为 1.0 MHz, 视频带宽 f_{VBW} 为 100 Hz。挡掉注入光束,被动激光器自由运转,其强度噪声高于相应的散粒噪声基准约 4 dB(图 2 中曲线 a, 强度噪声相对于其注入电流值非常敏感,一般情况下要高于散粒噪声基准)。在注入锁定的情况下,被动激光器的强度噪声被压缩到相应的散粒噪声基准以下约 0.8 dB(图 2 曲线 c)。

图 3 为射频频谱分析仪在分析频率为 30 MHz 时记录到的实验结果,挡掉来自主激光器的注入光束时,被动激光器的振幅噪声在相应的散粒噪声基准以上约 4.1 dB(图 3 曲线 a);在注入锁定时,被动激光器的振幅噪声则被压缩到相应的散粒噪声基准以下约 0.8 dB(图 3 曲线 c)。

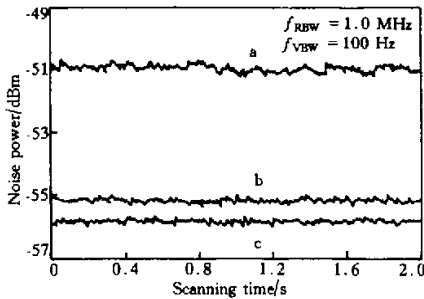


Fig. 3 The measured amplitude noise power spectrum of the slave laser at analysis frequency of 30 MHz. a: without injection locking beam; b: the shot noise limit; c: with injection locking beam

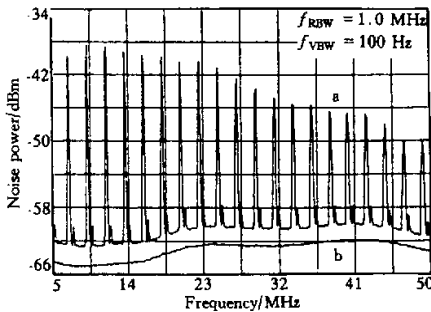


Fig. 4 The phase noise power spectrum of the slave laser. a: without injection locking beam; b: the electronics noise of the system

实验中采用失谐的共焦扫描干涉仪腔,通过其反射场将激光场相位噪声转换为强度噪声^[10,18],对被动激光器在注入锁定前后的相位噪声作了测量(图 4、图 5),频率范围为 5 MHz ~ 50 MHz。所用共焦扫描干涉仪腔的精细度约 100;用于测量共焦扫描干涉仪腔反射场强度噪声的探测器为 713A-3 型低噪声宽带光电二极管探测-放大器(Analog Modules 公司生产,带宽 1 kHz ~ 100 MHz)。在 5 MHz ~ 50 MHz 频率范围内,注入锁定使被动激光器的相位噪声降低了约 5 dB ~ 12 dB。

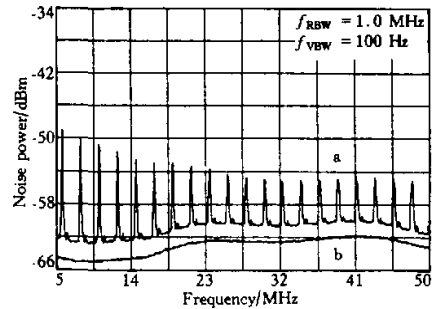


Fig. 5 The phase noise power spectrum of the slave laser. a: without injection locking beam; b: the electronics noise of the system

3 应用振幅压缩光测量铯饱和和蒸气样品的频率调制光谱

频率调制光谱是一种高灵敏的光谱技术,可以避免探测光场在低频段较大的噪声对光谱测量带来的影响。采用频率可调谐的压缩光场进行频率调制光谱测量,可在频率调制光谱高灵敏度的基础上进一步提高信噪比,原则上测量信噪比可突破相应的散粒噪声极限^[1,8,9]。由于单频半导体激光器可调谐,还可采用直接调制其注入电流的方法来实现频率调制,而无需在光路中采用光电相位调制器,所以可方便地应用在频率调制光谱测量中。采用合适波长的单频半导体激光器,再通过适当的技术途径实现频率可调谐的振幅压缩光场,可以方便地应用在原子(分子)样品的频率调制光谱测量中^[8,9],实现亚散粒噪声的频率调制光谱测量。

由于激光场在射频段的振幅噪声较低频段要低得多,因此采用由射频调制所产生的频率边带来进行频率调制光谱测量,可在很大程度上克服低频噪声的影响。由信号发生器(DS-345 型频率综合器,Stanford Research System 公司生产)产生的 15 MHz

的射频正弦信号,对主激光器直接进行调制以实现输出激光的相位调制。当射频正弦电压的幅度适当时,观察到在主激光器的主模两侧产生的射频“边带”。调节射频正弦信号的幅度即可改变调制深度,但过大的调制深度会带来大的剩余强度调制,对于光谱测量有较大的影响。实验中将“边带”幅度控制在主模的 3% 以下;即使如此,由于半导体激光器激活区介质的增益及折射率强烈地依赖于载流子密度,所以对主激光器较弱的射频调制仍然会造成一定的剩余强度调制。通过注入锁定,被动激光器即受主激光器的控制,其频率特性与主激光器相同,也产生相应的“边带”。由于被动激光器的工作电流远高于其阈值, $I/I_{th} = 8.3$, 来自主激光器的剩余强度调制并不会传递至被动激光器,而在被动激光器中很大程度上被抑制^[8]。

在图 1 中的平衡探测系统前,将被动激光器输出的射频调制的振幅压缩光分出功率约 1% 的弱光束经过铯饱和和蒸气样品,然后再与透射的强光束非相干地叠加在一起,入射到平衡探测系统中,如图 6 所示。

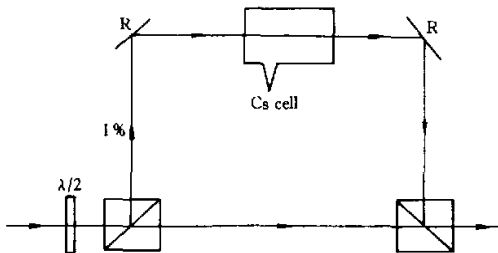


Fig. 6 The scheme for FM spectrum measurement of saturated cesium cell

事实上,尽管被动激光器的相位噪声已通过注入锁定在一定程度上被抑制,但被动激光器的相位噪声仍较大,当共振的探测光束通过铯饱和和蒸气样品时,由于原子系统的色散作用会强烈地将相位噪声转换为振幅噪声(室温下铯饱和和蒸气样品中的铯原子密度较大,这种转换作用很强)。实验中采用半导体致冷元件将铯原子冷却的温度控制在约 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,以降低铯原子密度,从而可在一定程度上减弱这种噪声转换过程对测量信噪比的影响。

当主激光器在低频三角波电压的扫描下,其频率扫过铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$ 对应的多普勒吸收谱线时,被动激光器也同时扫过该谱线;采用平衡探测系统中与扫描主激光器频率的低频三角波同步的射频频谱分析仪(其分析频率为

15MHz),在射频调制频率处对信号进行分析。图 7 中曲线 a 为实验中记录到的典型的“M”型频率调制谱线,对应于多普勒展宽的铯原子 $6^2S_{1/2} F=4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$ 的吸收线。中间的凹陷对应于主峰频率与铯样品共振时,两边带与样品作用相消的情形;两边峰对应于两边带分别与铯样品共振叠加时的情形。图 7 中曲线 b 对应于散粒噪声极限。在远离共振频率的低频区和高频区,信号低于散粒噪声 0.7 dB,换句话说,当一微弱信号的幅度大约仅有 0.7 dB 时,用上述压缩光测量可检测出此信号的存在,而用处于散粒噪声基准的普通相干光却无能为力。故其信噪比较相应的散粒噪声极限提高了约 0.7 dB。

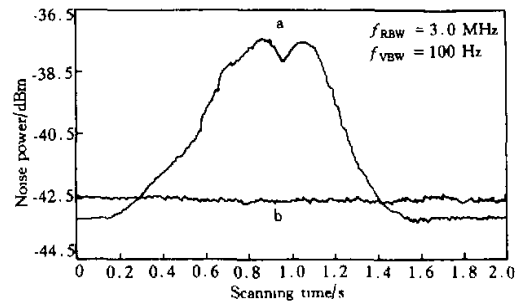


Fig. 7 The FM spectrum of saturated cesium vapor cell with squeezed light at analysis frequency of 15 MHz. a: the FM spectrum of D_2 line of Cs atoms with Doppler broadening ($6^2S_{1/2} F=4 \leftrightarrow 6^2P_{3/2} F'=3,4,5$); b: the shot noise limit

小结 通过半导体激光器的注入锁定,产生了频率在铯原子 D_2 线附近(852.356 nm)连续调谐 1 GHz 以上约 0.8 dB 的振幅压缩光,注入锁定使被动激光器相位噪声降低了 5 dB~12 dB。应用频率可调谐振幅压缩光进行了铯饱和和蒸气样品亚散粒噪声极限的频率调制光谱演示测量,信噪比较散粒噪声极限提高了约 0.7 dB。

参 考 文 献

- [1] Polzik E S, Carri J, Kimble H J. Spectroscopy with Squeezed light. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(20):3020~3023
- [2] 彭堃掣,黄茂全,刘晶等.双模光场压缩态的实验研究. *物理学报*, 1993, **42**(7):1079~1085
- [3] Georgiades N P, Polzik E S, Edamatsu K *et al.*. Nonclassical excitation for atoms in a squeezed vacuum. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(19):3426~3429
- [4] Peng K C, Pan Q, Wang H *et al.*. Generation of two-

- mode quadrature-phase squeezing and intensity-difference squeezing from a CW-NOPO. *Appl. Phys. (B)*, 1998, **66**(6):755~758
- [5] Kuznich A, Mølmer K, Polzik E S. Spin squeezing in an ensemble of atoms illuminated with squeezed light. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(24):4782~4785
- [6] Machida S, Yamamoto Y, Itaya Y. Observation of amplitude squeezing in a constant-current-driven semiconductor laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(10):1000~1003
- [7] Zhang Tiancai, Hou Zhanjia, Wang Junmin *et al.*. Generation of intensity squeezing in LD by weak external cavity feedback. *Chinese Phys. Lett.*, 1996, **13**(10):734~736
- [8] Kasapi S, Lathi S, Yamamoto Y. Amplitude-squeezed frequency-modulated tunable diode-based source for sub-shot-noise FM spectroscopy. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(7):478~480
- [9] Marin F, Bramati A, Jost V *et al.*. Demonstration of high sensitivity spectroscopy with squeezed semiconductor lasers. *Opt. Commun.*, 1997, **140**(1~3):146~157
- [10] 张天才, 李廷鱼, 谢常德等. 自锁定半导体激光器中强度压缩及相位噪声的减小. *物理学报*, 1998, **47**(9):1498~1503
- [11] Heidmann A, Horowitz R J, Reynaud S *et al.*. Observation of quantum noise reduction on twin laser beams. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(22):2555~2561
- [12] Ribeiro P H S, Schwob C, Maître A *et al.*. Sub-shot-noise high-sensitivity spectroscopy with optical parametric oscillator twin beam. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(24):1893~1895
- [13] Gao Jiangrui, Cui Fuyun, Xue Chenyang *et al.*. Generation and application of twin beams from an optical parametric oscillator including an *a*-cut KTP crystal. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11):870~872
- [14] Yamamoto Y, Machida S, Nilsson O. Amplitude squeezing in a pump-noise-suppressed laser oscillator. *Phys. Rev. (A)*, 1986, **34**(4):4025~4042
- [15] Richardson W H, Machida S, Yamamoto Y. Squeezed photon-number noise and sub-poissonian electrical partition noise in a semiconductor laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(22):2867~2870
- [16] Freeman M J, Wang H, Steel D G *et al.*. Wavelength-tunable amplitude-squeezed light from a room-temperature quantum-well laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(24):2141~2143
- [17] Marin F, Bramati A, Giacobino E *et al.*. Squeezing and intermode correlation in laser diode. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **75**(25):4606~4609
- [18] Zhang T C, Poizat J P, Grelu P *et al.*. Quantum noise of free-running and externally-stabilized laser diodes. *Quant. & Semiclass. Opt.*, 1995, **7**(4):601~605
- [19] Wang H, Freeman M J, Steel D G. Squeezed light from injection-locked quantum well lasers. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(24):3951~3954

Generation of Frequency-Tunable Amplitude-Squeezed-Light and Application in FM Spectroscopy Measurement

Wang Junmin He Lingxiang Liu Tao Zhang Tiancai Peng Kunchi

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

(Revised 12 January 2000; revised 20 March 2000)

Abstract: The frequency-tunable amplitude-squeezed-light of the continuous tunable range over 1 GHz around the D_2 line of Cesium (Cs) at 852.356 nm and the squeezing degree about 0.8 dB was experimentally generated with an injection-locked laser diode. The amplitude-squeezed-light was applied in the frequency modulation (FM) spectroscopy measurement of Cs saturated vapor, the signal to noise ratio (SNR) of which was improved about 0.7 dB relative to the shot-noise-limit (SNL).

Key words: amplitude-squeezed-light; laser diode; injection locking; frequency modulation spectroscopy; signal to noise ratio