

## 铯原子 D2 线无多普勒噪声谱的测量

李媛<sup>1,2</sup>, 马荣<sup>1</sup>, 蔡德欢<sup>1</sup>, 郜江瑞<sup>1</sup>, 张俊香<sup>1\*</sup>

(1. 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;

2. 合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章阐述了共振介质的吸收和色散特性导致光场的位相噪声向振幅噪声转化的原理;在速度选择光泵浦的作用下,共振频率附近介质的吸收进一步增强,位相噪声向振幅噪声转化更有效,在实验上得到了铯原子 D2 线不受交叉吸收线影响的无多普勒吸收谱和噪声谱. 噪声谱中每个“M”都对应一条跃迁能级吸收线,中心的最低点严格对应共振跃迁频率. 噪声谱可以作为一种高分辨率光谱,用于研究原子的能级结构,原子的吸收和色散,尤其是可以作为一种高灵敏度的探测光场的位相噪声的方法.

**关键词:**速度选择光泵浦;无多普勒;噪声谱

**中图分类号:**O431;O562      **文献标志码:**A

在原子物理学中,可用于精密测量的原子高分辨率光谱已经被广泛地应用于各个方面,如原子钟<sup>[1-2]</sup>、波长标准<sup>[3]</sup>、原子磁力计<sup>[4]</sup>、频率稳定<sup>[5]</sup>、光减速<sup>[6]</sup>和光存储<sup>[7]</sup>. 传统的高分辨率光谱是指光通过样品介质后形成的能够反映介质能级情况的强度谱,如饱和吸收光谱(SAS)<sup>[8]</sup>、偏振光谱(PS)<sup>[9]</sup>和速度选择光抽运光谱(VSOPS)<sup>[10]</sup>. 1991年, Yabuzaki 小组提出了一种新型的高分辨率光谱,通过原子介质的光场的振幅噪声谱也可以反映原子的能级结构<sup>[11]</sup>,理论上已经证明这是由于共振介质可以使光场的位相噪声向振幅噪声转化<sup>[12]</sup>.

如文献<sup>[13]</sup>所述,光场的位相噪声向振幅噪声转化与原子介质的吸收和色散特性有关,色散越强转化越多. 具有色散特性的光学腔也可以实现这样的噪声转化<sup>[14]</sup>. 速度选择光泵浦可以影响原子的吸收和色散特性<sup>[15-16]</sup>,如  $\Lambda$  型铷原子 EIT 系统中的吸收增强<sup>[17]</sup>,铷原子的色散增强形成快慢光<sup>[18]</sup>. 最近, Giacobino 小组从理论和实验上验证了,在光泵浦作用下 EIT 的透明程度提高,线宽压窄,色散增强<sup>[19-20]</sup>. 2001年, Kitching 小组已经指出光泵浦影响共振介质中频率调制向强度调制的转化<sup>[21-22]</sup>. 我们小组首次在实验上验证了在速度选择光泵浦的作用下铯原子 D1 线的吸收谱和噪声谱的提高,并在理论上通过对介质吸收和色散特性的分析对高分辨率噪声谱进行了定性解释<sup>[23]</sup>. 本文将研究铯原子 D2 线的情况,在速度选择光泵浦的作用下,在实验上得到了铯原子 D2 线的无多普勒吸收谱和噪声谱.

### 1 共振介质中光场位相噪声向振幅噪声转化的理论解释

半导体激光器的量子噪声包括激光的位相噪声和振幅噪声,当半导体激光器远离阈值运行时,其振幅噪声较低,几乎等于散粒噪声基准,而通常位相噪声远高于散粒噪声基准,并且激光器的线宽由它决定. 1983年,美国的一个小组在实验上观察到了单频激光场的谱边带,他们认为“边带是由输入场的位相噪声和强度噪声引起的”<sup>[24]</sup>. 基于这个思想我们用频率调制理论解释共振介质中光场位相噪声向振幅噪声的转化<sup>[25-26]</sup>. 假定半导体激光器的输出场由一个单频载波和一对较弱的频率调制白噪声边带产生. 理想的单频载波表达为  $E(t) = E_0 e^{i\omega_c t}$ , 其中  $E_0$  表示场振幅,  $\omega_c$  表示激光频率. 因此,具有位相噪声的光场可以表示为:

$$E_1(t) = E_0 e^{i\omega_c t} [1 + M \sin(\omega_m t + \varphi)] e^{i\beta \sin \omega_m t} \quad (1)$$

\* 收稿日期:2013-03-18;修回日期:2013-03-25

基金项目:国家自然科学基金(11274210);国家重点基础研究发展计划(2010CB923102)

作者简介:李媛(1985—),女,山西襄汾人,博士研究生,主要从事光与原子相互作用的研究. E-mail:liyuan19850704@163.com. \* 通信联系人:Email:junxiang@sxu.edu.cn

其中,  $\beta$  表示位相噪声的调制率,  $M$  表示位相噪声的振幅调制系数.  $E_1$  用 Bessel 函数展开可写为  $E_2$ :

$$E_2(t) = E_0 e^{i\omega_c t} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\beta) e^{in\omega_m t} \quad (2)$$

当  $\beta \ll 1$  时, 通过碱金属原子前的光场可以写为:

$$E_{in}(t) = 1/2 \tilde{E}_{in}(t) + c. c. \quad (3)$$

其中:

$$\tilde{E}_{in}(t) = E_0 \left\{ -\frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + \exp(i\omega_c t) + \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (4)$$

这个边带频率为  $\omega_c \pm \omega_m$  的 FM 光谱经过一个长度为  $L$  的碱金属原子介质样品, 强度吸收系数为  $\alpha$ , 折射率  $n$  为光学频率的函数. 为了方便, 定义每一个光谱成分的振幅透射为  $T_j = \exp(-\delta_j - i\Phi_j)$ , 衰减为  $\delta_j = \alpha_j \frac{L}{2}$  和相移为  $\Phi_j = n_j L (\omega_c + j\omega_m)/c$ ,  $j=0, \pm 1$  对应频率  $\omega_c, \omega_c \pm \omega_m$ ,  $\Phi_j$  描述每个光谱成分的相移,  $\delta_j$  为振幅衰减. 透射场通过样品后:

$$E_{out}(t) = 1/2 \tilde{E}_{out}(t) + c. c. \quad (5)$$

其中:

$$\tilde{E}_{out}(t) = E_0 \left\{ -T_{-1} \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c - \omega_m)t] + T_0 \exp(i\omega_c t) + T_1 \frac{M}{2} \exp[i(\omega_c + \omega_m)t] \right\} \quad (6)$$

在  $M^2 \ll 1$  和  $\alpha_0 \ll 1$  条件下, 一个快速响应探测器在  $\omega_m$  处所探测到的强度为:

$$I = E_0^2 [1 + M(\omega_m) \sqrt{f(\omega_m)} \sin(\omega_m t + \varphi)] \quad (7)$$

这里  $f(\omega_m)$  含有载波的和边带的振幅衰减信息和相位变化信息.  $f(\omega_m)$  函数为如下表达式:

$$f(\omega_m) = \exp[2(\alpha_0 - \alpha_{-1})L] + \exp[2(\alpha_0 - \alpha_1)L] - 2\exp(2\phi_0 - \phi_1 - \phi_{-1})L \quad (8)$$

当原子经过碱金属介质时, 其传输常数发生改变. 从真空的表达式  $\kappa = \kappa_0 = \frac{\omega_c + j\omega_m}{c}$  变化到  $\kappa = \kappa_0 =$

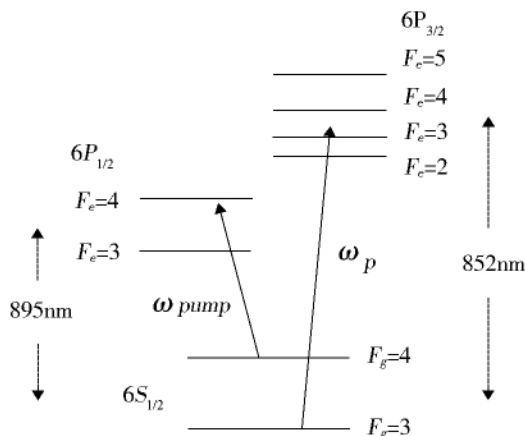
$\sqrt{1 + \chi'_j + i\chi''_j} = \phi_j - i\alpha_j$ . 其中,  $\chi'_j$  和  $\chi''_j$  [27] 分别表示介质色散和吸收特性.

结合  $\chi'_j, \chi''_j$  的表达式 [27] 和式 (8) 得到  $f(\omega_m)$  并带入式 (7), 可以看出在  $\omega_m$  处所探测到的强度  $I$  包含了相位变化信息, 即相位噪声向强度噪声转化, 并且强度噪声与介质的吸收  $\chi''_j$  和色散  $\chi'_j$  有关. 文献 [23] 中指出: 半导体激光器输出的光场通过共振介质后, 它的位相噪声向振幅噪声转化, 噪声谱呈双峰 (“M” 型) 结构, “M” 的最高点的高度表示探测场的位相噪声, 中心的最低点严格对应原子的跃迁共振频率; 并且在速度选择光泵浦的作用下, 共振频率附近吸收增强, 色散增大, 位相噪声到振幅噪声的转化增多.

## 2 能级结构和实验装置

如图 1(P189) 所示, 为铯原子  $^{133}\text{Cs}$  的  $D_1$  和  $D_2$  线的能级结构示意图, 基态为  $6^2S_{1/2}, F_g = 3, 4$ , 两组激发态分别为  $6^2P_{1/2}, F_e = 3, 4$  和  $6^2P_{3/2}, F_e = 2, 3, 4, 5$ , 对应的自发辐射率分别为  $2\pi \times 4.6 \text{ MHz}$  和  $2\pi \times 5.2 \text{ MHz}$ . 激发态  $6^2P_{1/2}$  的超精细能级的间隔为  $1.168 \text{ GHz}$ , 远大于室温下原子的多普勒展宽  $\Delta\nu_D \approx 405 \text{ MHz}$ ; 激发态  $6^2P_{3/2}$  的超精细能级的间隔从上到下分别为  $251 \text{ MHz}, 201 \text{ MHz}$  和  $151 \text{ MHz}$ , 均小于多普勒展宽, 因此如果一束光在  $D_2$  线跃迁频率附近扫描, 经过原子气室后光场的吸收谱中将出现一个较宽范围的多普勒吸收背景, 无法辨别三条吸收线 [19]. 探测场  $\omega_p$  作用在  $D_2$  线的跃迁能级  $F_g = 3 \leftrightarrow F_e = 2, 3, 4 (6^2P_{3/2})$  上, 其频率扫描范围较宽, 包含这三个跃迁频率; 泵浦场  $\omega_{pump}$  与  $D_1$  线的跃迁能级  $F_g = 4 \leftrightarrow F_e = 4$  共振作用.

如图 2(P189) 所示, 为实验装置图. 探测场和泵浦场分别由两台 Toptica DL100 半导体激光器产生, Toptica DL100 线宽约为  $1 \text{ MHz}$ . 探测场的功率为  $40 \mu\text{W}$ , 耦合场的功率为  $70 \mu\text{W}$  且两束光的偏振相互垂直. 两束光经第一个 PBS 耦合后, 以一个小角度通过铯泡并在第二个 PBS 上分开, 耦合光被 PBS 反射探测光透射. 透射探测场的小部分光被 99/1 分束器反射, 进入探测器 3 用来监视探测场的吸收谱; 绝大多数的光进入自零拍探测系统 (也就是被 50/50 的分束器分为相同的两部分, 分别被相同的低噪声探测器 1、2 探测,

图 1  $^{133}\text{Cs}$  的 D1 和 D2 线的能级结构示意图Fig. 1 (Color online) Relevant energy levels of  $^{133}\text{Cs}$  D1 and D2 line

交流信号被加、减法器相加或相减, 最后用 Agilent E4411B 谱仪来观察. 相减的信号表示散粒噪声基准 (SNL), 相加的信号表示探测场的振幅噪声, 用来测量探测场的振幅噪声. 耦合场与探测场的直径分别为 1.2 mm 和 0.8 mm. 铯泡长 7.5 cm, 外部包有三层高磁导率合金 ( $\mu$ -metal), 用来屏蔽外界磁场.

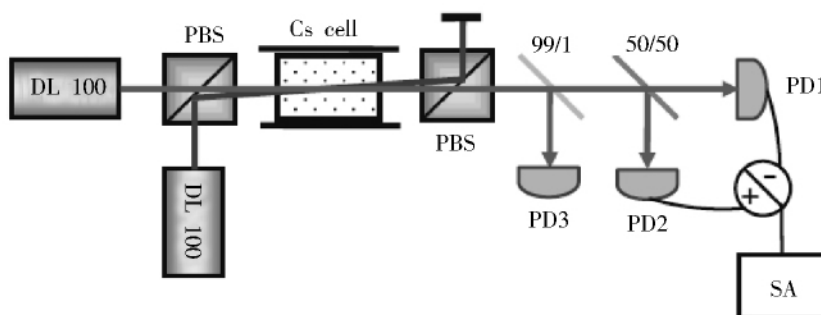


图 2 实验装置图. PBS: 偏振分束镜; 99/1, 50/50:

分束器; PD1, 2: 低噪声交直流探测器 S5971; PD3: 光电探测器; SA: 谱仪

Fig. 2 Experimental setup. (Color online) PBS: polarizing beam splitter; 99/1, 50/50:

beam splitters; PD1, 2: balanced homodyne detector; PD3: photo detector; SA: spectrum analyzer

### 3 实验结果

在强泵浦场  $\omega_{pump}$  的共振作用下, 布局在基态  $F_g = 4 (6^2 S_{1/2})$  上零速度的原子将被激发, 由于自发辐射和光泵浦作用, 原子将在基态  $F_g = 3 (6^2 S_{1/2})$  上积聚. 与探测场  $\omega_p$  作用的基态和激发态能级之间的布局数差增大, 探测场的吸收将会增强, 尤其是共振处的吸收增强的最多, 如图 3(a) (P190) 中的曲线 (1) 所示. 图 3(a) 中曲线 (2) 是作为参考的探测场的饱和吸收谱. 透射谱的多普勒吸收背景中出现了三条吸收凹线, 与三个跃迁共振频率分别对应, 相应的色散也增强, 位相噪声向振幅噪声的转化更有效, 从而噪声谱也会提高<sup>[12]</sup>.

同时形成的振幅噪声谱如图 3(b) 所示, 曲线 (1) 表示探测场的输出振幅噪声谱, 曲线 (2) 表示 SNL. 在三个跃迁频率附近, 分别出现了一个“M”型的噪声谱. 如果没有泵浦场的作用, 探测场的透射谱就是由于多普勒效应导致的一个宽范围的吸收凹线, 对应的噪声谱也是一个宽范围的“M”型曲线, 无法辨别三条吸收线<sup>[28]</sup>. 对比图 3(a) 和图 3(b), 可以看到各个“M”型噪声谱的中心最低点与各自相应跃迁能级的饱和吸收峰严格对应, 即得到了铯原子 D<sub>2</sub> 线关于基态  $F_g = 3$  的无多普勒噪声谱, 并且不存在交叉线.

### 4 总结

本文通过共振介质中光场的位相噪声向振幅噪声的转化, 在速度选择光泵浦的作用下得到了铯原子 D<sub>2</sub>

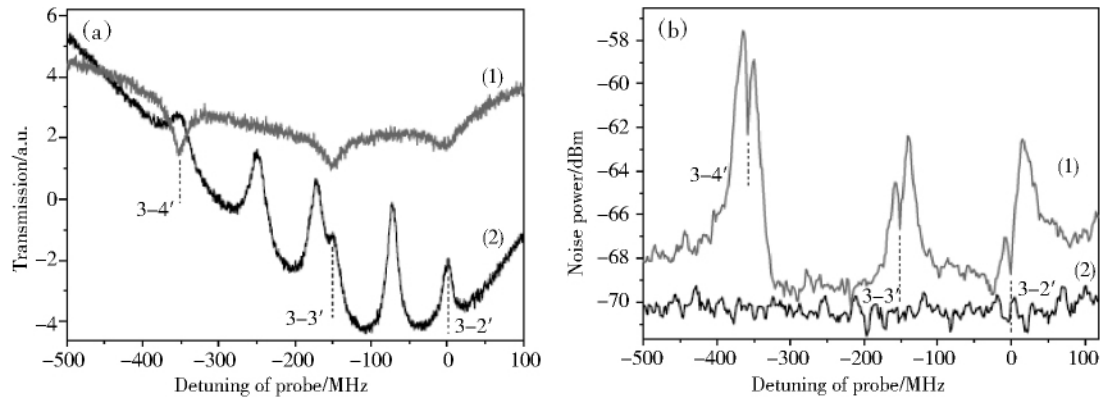


图3  $^{133}\text{Cs}$  D<sub>2</sub> 线的无多普勒速度选择光抽运光谱(a)和噪声谱(b). 图(a)中的曲线(1)表示探测场的无多普勒速度选择光抽运光谱, 曲线(2)表示探测场的频率标准的饱和吸收谱; 图(b)的曲线(1)表示探测场的无多普勒噪声谱, 曲线(2)表示 SNL; 实验参数: 谱仪的分析频率为 3 MHz, 分析带宽 RBW=300 kHz, 视频带宽 RBW=1 kHz, 探测场和耦合场的功率分别为  $40\ \mu\text{W}$ 、 $70\ \mu\text{W}$

Fig. 3 (Color online) Doppler-free velocity selective optical pumping spectrum (a) and the noise spectrum (b) of  $^{133}\text{Cs}$  D<sub>2</sub> line. In (a), the curves represent: (1) (red line) the Doppler-free velocity selective optical pumping spectrum of the probe field, (2) (black line) SAS of the probe field; In (b), the curves are: (1) (red line) the Doppler-free noise spectrum of the probe field, (2) (black line) SNL. Experiment parameters: the spectrum analyzer is operated at the center frequency of 3 MHz with zero span, the resolution bandwidth (RBW)=300 kHz, the video bandwidth (VBW)=1 kHz, the probe power is  $40\ \mu\text{W}$  and the pump power is  $70\ \mu\text{W}$ , respectively

线的无多普勒噪声谱. 首先, 用频率调制理论解释了共振介质中光场位相噪声向振幅噪声的转化; 其次, 简单分析了光泵浦对共振介质的吸收和色散特性的影响, 实验上在速度选择光泵浦的作用下得到了 D<sub>2</sub> 线关于基态  $F_g=3$  的无多普勒噪声谱, 从而得出通过原子的光场噪声谱可以作为一种高分辨率光谱. 高分辨率的噪声谱可以用来研究原子的能级结构, 原子的吸收和色散, 尤其是可以作为一种高灵敏度的探测光场的位相噪声的方法.

#### 参考文献:

- [1] Knappe S, Shah V, Schwindt P D D, *et al.* A Microfabricated Atomic Clock [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **85**:1460-1462.
- [2] Chwalla M, Benhelm J, Kim K, *et al.* Absolute Frequency Measurement of the  $^{40}\text{Ca}^+ 4s^2S_{1/2} - 3d^2D_{5/2}$  Clock Transition [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **102**:023002.
- [3] Tetu M, Cyr N, Villeneuve B, Theriault S, *et al.* Toward the Realization of a Wavelength Standard at 780 nm Based on a Laser Diode Frequency Locked to Rubidium Vapor [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1991, **40**:191-195.
- [4] Affolderbach C, Stähler M, Knappe S, *et al.* An All-optical High-sensitivity Magnetic Gradiometer [J]. *Appl Phys B: Lasers and Optics*, 2002, **75**:605-612.
- [5] E. de Carlos López, López Romero J M. Laser Frequency Stabilization Using fm Optical Pumping Spectroscopy [J]. *Rev Mex Fis*, 2008, **54**:222-228.
- [6] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, *et al.* Light Speed Reduction to 17 Meters per Second in an Ultracold Atomic Gas [J]. *Nature (London)*, 1999, **397**:594-598.
- [7] Fleischhauer M, Lukin M D. Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**:5094-5097.
- [8] Hänsch T W, Shahin I S, Schawlow A L. Optical Resolution of the Lamb Shift in Atomic Hydrogen by Laser Saturation Spectroscopy [J]. *Nature (London)*, *Phys Sci*, 1972, **235**:63-65.
- [9] Wieman C, Hänsch T W. Doppler-Free Laser Polarization Spectroscopy [J]. *Phys Rev Lett*, 1976, **36**:1170-1173.
- [10] Pinard M, Aminoff C G, Laloë F. Velocity-selective Optical Pumping and Doppler-free Spectroscopy [J]. *Phys Rev A*, 1979, **19**:2366-2370.
- [11] Yabuzaki T, Mitsui T, Tanaka U. New Type of High-resolution Spectroscopy with a Diode Laser [J]. *Phys Rev Lett*,

- 1991, **67**:2453-2456.
- [12] Walser R, Zoller P. Laser-noise-induced Polarization Fluctuations as a Spectroscopic Tool [J]. *Phys Rev A*, 1994, **49**: 5067-5077.
- [13] Martinelli M, Valente P, Failache H, *et al.* Noise Spectroscopy of Nonlinear Magneto-optical Resonances in Rb Vapor [J]. *Phys Rev A*, 2004, **69**:043809.
- [14] Alessandro S, Villar S. The Conversion of Phase to Amplitude Fluctuations of a Light Beam by an Optical Cavity [J]. *Am J Phys*, 2008, **76**:922-929.
- [15] Happer W. Optical Pumping, Rev. Mod [J]. *Phys*, 1972, **44**:169-249.
- [16] Aminoff C G, Pinard M. Velocity Selective Optical Pumping [J]. *J Physique*, 1982, **43**:263-277.
- [17] Chakrabarti S, Pradhan A, Ray B, *et al.* Velocity Selective Optical Pumping Effects and Electromagnetically Induced Transparency for D2 Transitions in Rubidium [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2005, **38**:4321-4327.
- [18] Akulshin A, Singh M, Sidorov A, *et al.* Steep Atomic Dispersion Induced by Velocity-selective Optical Pumping [J]. *Opt Express*, 2008, **16**:15463-15468.
- [19] Mishina O S, Scherman M, Lombardi P, *et al.* Electromagnetically Induced Transparency in an Inhomogeneously Broadened  $\Lambda$  Transition with Multiple Excited Levels [J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**:053809.
- [20] Scherman M, Mishina O S, Lombardi P, *et al.* Enhancing Electromagnetically-induced Transparency in a Multilevel Broadened Medium [J]. *Opt Express*, 2012, **20**:4346-4251.
- [21] Kitching J, Hollberg L, Knappe S, *et al.* Frequency-dependent Optical Pumping in Atomic Lambda-systems [J]. *Opt Lett*, 2001, **26**:1507-1509.
- [22] Kitching J, Robinson H G, Hollberg L, *et al.* Optical-pumping Noise in Laser-pumped, All-optical Microwave Frequency References [J]. *J Opt Soc Am B*, 2001, **18**:1676-1683.
- [23] Yuan Li, Dehuan Cai, Rong Ma, *et al.* Resolution Enhancement in Noise Spectrum by Using Velocity Selective Optical Pumping in Cesium Vapor [J]. *Appl Phys B: Lasers and Optics*, 2012, **109**:189-194.
- [24] Vahala K, Harder Ch, Yariv A. Observation of Relaxation Resonance Effects in the Field Spectrum of Semiconductor Lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1983, **42**:211-213.
- [25] Bjorklund G C, Levenson M D. Frequency Modulation (FM) Spectroscopy [J]. *Appl Phys B*, 1983, **32**:145-152.
- [26] 王海红. 原子相干效应中量子噪声特性的研究[D]. 太原:山西大学硕士学位论文, 2006.
- [27] Scully M O, Zubairy M S. Quantum Optics [M]. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1997:236-239.
- [28] Messaoud Bahoura, André Clairon. Diode-laser Noise Conversion in an Optically Dense Atomic Sample [J]. *Opt Lett*, 2001, **26**:926-928.

## Cesium Atoms D2 Line Doppler-Free Noise Spectra Measurements

LI Yuan<sup>1,2</sup>, MA Rong<sup>1</sup>, CAI De-huan<sup>1</sup>, GAO Jiang-rui<sup>1</sup>, ZHANG Jun-xiang<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics

Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper presents an analysis of the laser phase noise to amplitude noise conversion resulted from the absorption and dispersion properties of the resonant medium theoretically; under the effect of velocity selective optical pumping the absorption is enhanced near the resonant frequency, and the conversion from phase to amplitude noise is more effective, so we observe the Cs atomic D2 line Doppler-free absorption and noise spectrum experimentally without cross lines. Each ‘M’ in the noise spectrum corresponds to an atomic absorption line, and the middle dip of ‘M’ shape corresponds to the resonant frequency precisely. Noise spectrum can be used as a kind of high resolution spectrum to research the atomic energy level structure and study the absorption and dispersion of the atom, especially it can be used as a high sensitive method to detect phase noise of the light field.

**Key words:** velocity selective optical pumping; doppler-free; noise spectrum