

单光子波长调制吸收光谱用于 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光器的波长锁定*

王晓波 马维光 王晶晶 肖连团[†] 贾锁堂

(山西大学激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2011年6月25日收到; 2011年10月14日收到修改稿)

提出了一种 kHz 调制频率量级的单光子调制技术, 实现对激光器的实时锁定. 通过探测乙炔气体的单光子吸收光谱, 对离散的单光子响应脉冲进行锁定放大, 获得激光器频率锁定的鉴频曲线. 将 $1.5\ \mu\text{m}$ 分布反馈半导体激光器的输出频率稳定在乙炔气体 $\nu_1 + \nu_3$ 带 $P5e$ 支吸收峰上, 在 175 s 内典型激光频率起伏小于 25 MHz. 这种基于单光子波长高频调制吸收光谱的稳频技术消除了低频段较高背景的噪声, 可应用于单光子量级的量子保密通讯系统以及光学波分复用系统.

关键词: 单光子调制, 吸收光谱, 锁定

PACS: 42.60.Fc, 42.62.-b, 42.79.-e

1 引言

单光子与超冷原子、分子以及单原子/分子的相互作用为量子信息处理提供了理想的条件, 对于量子态的精密探测和高精度控制, 以及控制量子比特间的相互作用具有重要意义^[1-3]. 在可扩展的量子网络中以原子和光子作为信息载体, 单光子与原子的耦合及相干控制是量子信息物理的关键所在. 人们通过单光子与单原子接口实现了单光子的量子存储^[4]; 通过光场与单分子的强耦合作用, 实现了单光子吸收测量^[5]等. 此外, 在量子保密通讯领域单光子也具有非常重要的意义, 单光子是长距离传送量子态和分发纠缠的理想载体^[6].

激光频率锁定的方法有很多, 通常利用原子分子共振吸收光谱、吸收荧光等作为锁腔参考信号. 然而, 强光作用易导致光与原子分子的共振频移^[7]与吸收加宽. 基于单光子的激光频率锁定可有效解

决上述问题, 可应用于一些特定场合, 如量子保密通讯、微弱光与单原子/分子的相互作用等领域.

基于单光子的光子计数调制可有效提高信噪比^[8,9], 人们利用光子计数调制的方法进行了相位锁定^[10-12], 但是光子计数调制的方法只能用于慢速调制 (Hz 量级), 不能直接用于快速跟踪与锁定. 我们提出了一种 kHz 调制频率量级的单光子调制方案, 通过对离散的单光子响应脉冲进行锁定放大, 以获得鉴频曲线, 实现对激光器的实时锁定.

2 单光子波长调制原理

波长调制的方法就是将信号加载到高频波段, 通过减小探测带宽的方法来降低低频噪声对信噪比的影响. 当激光发射波长在中心频率 ν_0 处以调制频率 f 进行调制时, 激光发射波长的瞬时频率

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603, 2010CB923103)、国家自然科学基金 (批准号: 11174187, 61178009, 60908019, 10934004)、国家基金创新团队 (批准号: 60821004)、山西省科技基础条件平台建设项目 (批准号: 2011091016)、山西省高等学校中青年拔尖创新人才支持计划与山西省高等学校优秀创新团队支持计划资助的课题.

[†] E-mail: xlt@sxu.edu.cn

为 $\nu = \nu_0 + \delta\nu \cos(ft)$, $\delta\nu$ 为调制振幅, 通过样品吸收之后的激光强度可以表达为余弦 Fourier 级数:

$$I(\nu, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu) \cos(nft), \quad (1)$$

式中 $A_n(n > 0)$ 是不同的谐波成分, 它可以通过锁相放大器进行测量,

$$A_n(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu + \delta \cos \theta) \times e^{[-\sigma(\nu + \delta \cos \theta)L\rho]} \cos(n\theta) d\theta. \quad (2)$$

对于单光子波长调制, 如图 1 所示, 当入射光子被频率为 f 的正弦波调制时, t 时刻的瞬时计数率可以表述为 $P_n = r_0 + a \cos(2\pi ft)$, 这里 r_0 为计数率常数, a 代表调制深度. 在时间窗口 T 内的有效计数率可以表述为

$$r_T(T) = r_0 + a \left[\frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \right] \cos(2\pi f t + \pi f T). \quad (3)$$

在时间窗口内探测到的光子数其相位分配按照正弦调制 f 信号分布, 在积分时间 T 内锁放输出信号的幅度可表示为

$$I = \int_0^T \left[\sum_{n=1}^N P_n \frac{\sin(\pi f \tau + \phi_n)}{\pi f \tau + \phi_n} \right] \times \cos(2\pi f t) 2\pi f dt, \quad (4)$$

这里 I 为单光子调制的解调信号, 相干光的光子探测概率 $P_n = \frac{e^{-r_T T} (r_T T)^n}{n!}$, ϕ_n 为单光子相对于调制信号的实时相位, N 为在时间窗口 T 内探测到的光子数, τ 为单光子光电转换后的脉冲宽度.

解调信号的信噪比为

$$SNR = \frac{S}{(N_s + N_b)(\Delta f / f_n)}, \quad (5)$$

这里 S 为光子计数对应的模拟信号, N_s 是指散粒噪声, N_b 是背景噪声, 包含暗计数和背景光子数, Δf 为滤波带宽, f_n 为噪声分布带宽. 压缩滤波带宽 Δf , 即增加积分时间 T 可降低相应的噪声信号, 增加信噪比. 可见, 适当提高积分时间 T , 可以得到更好的信号灵敏度, 但是在脉冲重复频率一定的情况下, 灵敏度的提高要以损失分辨率为代价, 所以通常需要根据系统所需的分辨率或灵敏度选取合

适的采样时间.

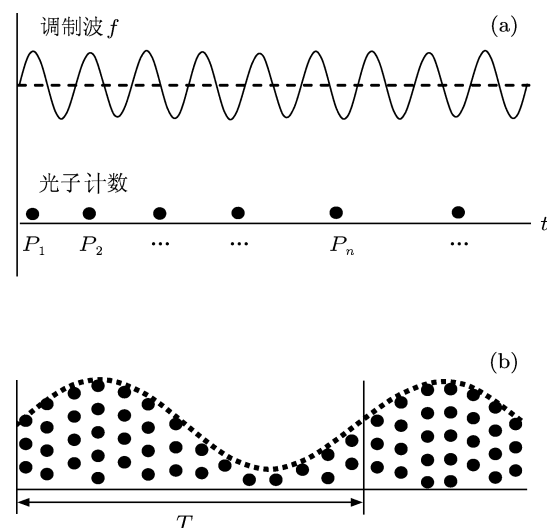


图 1 单光子调制原理图 (a) 当入射光子被正弦波调制时, 对应 t 时刻的瞬时单光子探测概率; (b) 在时间窗口 T 内探测到的光子数其相位分配按照正弦调制 f 信号分布

3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 图中虚线为光纤内传输的光信号, 实线为电信号. 分布式反馈 (DFB) 激光器 (NTT, NLK1C5GAAA) 输出波长 $1528 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$ 可调, 将正弦调制信号加在激光器电流调制端进行波长调制, 利用乙炔气体的吸收光谱将激光频率锁定在乙炔气体的吸收线上, 利用单光子波长调制技术实现对 DFB 激光器的频率稳定.

函数发生器 (Tektronix, AFG3102) 通道一输出频率为 10 Hz 的三角波信号扫描激光器频率, 扫描电压幅度为 100 mV , 同时函数发生器输出一频率为 210 kHz 的正弦信号作为调制信号, 通过加法器与扫频信号一起加到激光器的电流调制端, 调制电压幅度为 120 mV . 激光器输出激光经光纤隔离器和衰减器衰减至单光子量级 (平均光子数小于 1), 通过样品池后输出的单光子吸收信号耦合进入单光子探测器 (SPAD, Princeton, PGA600), 激光与乙炔吸收峰中心频率的偏离量转化为波长调制信号被 SPAD 接收, SPAD 由信号发生器 (Agilent 33250 A) 输出方波信号外触发, 触发频率为 900 kHz , SPAD 输出 TTL 脉冲序列信号, 对于入射到 SPAD 的一定光功率, 其输出的光子计数率正比于入射光功率.

函数发生器输出的正弦信号同时经移相器后,与 SPAD 探测的 TTL 信号进行混频,经低通滤波器后产生鉴频信号,即用于稳频的误差控制信号,输入比例积分微分控制器 (PID),用于改变鉴频信号的强度和响应时间, PID 的输出信号与 10 Hz 的三角波扫描信号经加法器叠加后输入激光器的电流调制端。

减小激光器扫描范围,观察鉴频信号和光电探测器监视的吸收信号.将扫描电压减小到零,然后将扫描信号关断,将鉴频信号馈入 DFB 激光器的电流调制端,实现闭环锁定。

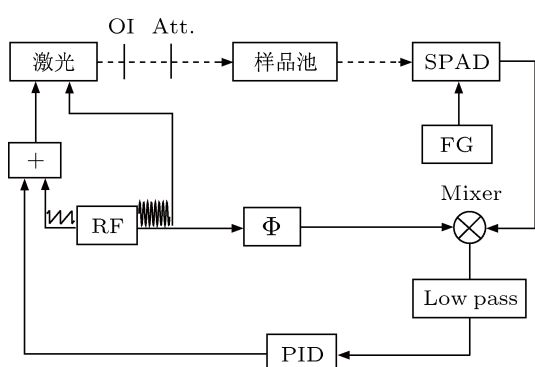


图2 实验装置示意图 OI 为光纤隔离器, Att 为可调光纤衰减器, RF 为射频信号发生器, FG 为函数发生器, Φ 为移相器

4 实验结果与分析

乙炔气体作为鉴频物质,具有吸收强度大、稳定性好、使用方便等特点,且非常容易获取.对于乙炔分子,吸收峰值主要集中在 $1.53\ \mu\text{m}$ 附近,选

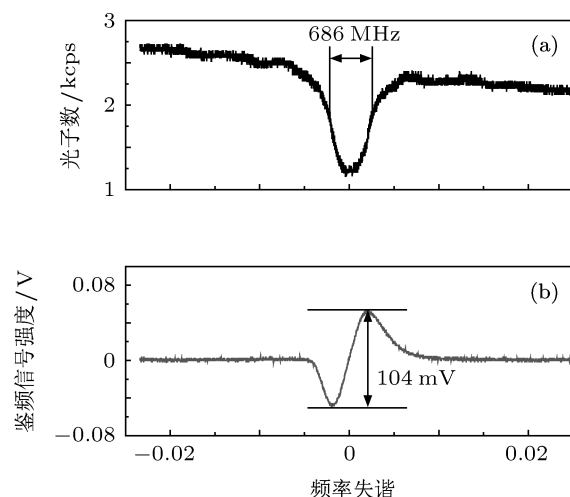


图3 (a) 乙炔样品吸收信号; (b) 对应的鉴频信号; 调制频率为 210 kHz, 调制电压幅度为 400 mV

择峰值波长为 $1\ 528\ \text{nm}$ 的吸收峰 $\nu_1 + \nu_3$ 带 $P5e$ 支,吸收峰的全高半宽约为 686 MHz,可以作为理想的参考频率。

图3为乙炔样品吸收信号及对应的鉴频信号.图3(a)为实验得到的光子计数吸收曲线,根据实验结果测算得到乙炔吸收线线宽约为 686 MHz,对应图(b)中鉴频信号的电压幅度为 104 mV,对应关系为 0.15 mV/MHz,信噪比为 51。

实验中,不同光子数对应鉴频信号的大小也不同.如图4(a)所示,光子数的增加会导致单光子探

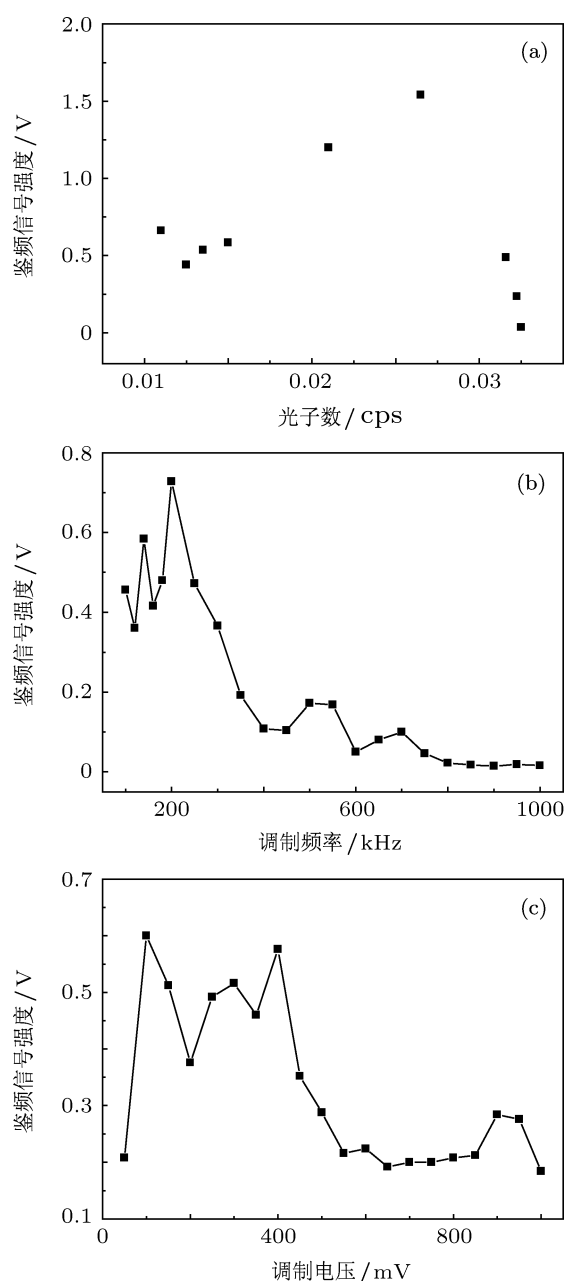


图4 (a) 鉴频信号幅度随每个脉冲周期的平均光子数变化特性; (b) 鉴频信号幅度随调制信号频率变化特性; (c) 鉴频信号幅度随调制信号幅度变化特性

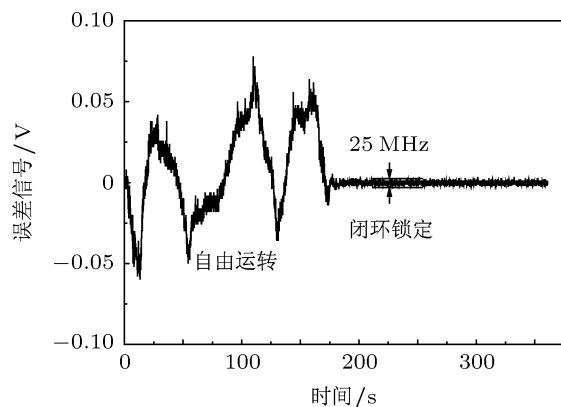


图5 DFB激光器在自由运转和闭环锁定时对应的鉴频信号

测器饱和, 而较低光子数导致鉴频信号较小. 这里采用 2.5 kHz 光子计数的激发光, 对应 900 kHz 的触发频率, 平均光子数为 0.026 (这里不考虑探测器效率的影响), 得到最大的鉴频信号. 不同调制频率对应鉴频信号的信噪比也不同, 实验中测量得到不同调制频率对应的鉴频信号如图 4(b) 所示, 根据测量结果, 我们选取 210 kHz 的正弦信号作为调制信号; 测量得到不同调制幅度对应的鉴频信号, 如图 4(c) 所示, 选取 120 mV 作为调制信号幅度, 以优

化鉴频信号.

减小激光器扫描范围, 观察鉴频信号和光电探测器监视的吸收信号. 将扫描电压减小到零, 并关断扫描信号, 将鉴频信号馈入 DFB 激光器的电流调制端, 实现闭环锁定. 调节比例积分电路的增益和积分时间以便获得稳定的激光频率输出. 图 5 为 DFB 激光器在自由运转和闭环锁定时分别对应的误差信号, 记录时间为 175 s. 在自由运转时可以看到其频率起伏较大, 由图中误差信号起伏的电压幅度可估算对应的激光频率起伏约 600 MHz. 而在闭环锁定后, 对应的激光频率起伏在 25 MHz 以下.

5 结论

利用 210 kHz 的调制信号对激光进行单光子波长调制, 由单光子探测器探测乙炔气体的吸收光谱产生的鉴频信号对 DFB 激光器进行稳频, 获得了优于 25 MHz 的频率稳定度. 这种单光子波长调制吸收光谱稳频技术具有避免低频段较高的强度噪声和较大的频率捕获范围的优点, 可应用于量子保密通讯系统与波分复用.

- [1] Yamada S 2009 *Anal. Sci.* **25** 1059
- [2] Price G N, Bannerman S T, Narevicius E, Raizen M G 2007 *Laser Phys.* **17** 1
- [3] Young B C, Cruz F C, Itano W M, Bergquist J C 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3799
- [4] Wilk T, Webster S C, Kuhn A, Rempe G 2007 *Science* **17** 488
- [5] Pinotsi D, Imamoglu A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093603
- [6] Piro N, Rohde F, Eschner J 2011 *Nature Phys.* **7** 17
- [7] Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 161101
- [8] Huang T, Dong S L, Guo X J, Xiao L T, Jia S T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061102
- [9] Wang X B, Wang J J, Zhang G F, Xiao L T, Jia S T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064204
- [10] Pulford D, Robillard C, Huntington E 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 063114
- [11] Bateman J E, Murray R L D, Freegarde T 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1530
- [12] Pulford D, Robillard C, Huntington E 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 063114

Single photon wavelength modulation absorption spectrum of acetylene for 1.5 μm laser wavelength stabilization*

Wang Xiao-Bo Ma Wei-Guang Wang Jing-Jing Xiao Lian-Tuan[†] Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 25 June 2011; revised manuscript received 14 October 2011)

Abstract

We describe a kHz single photon wavelength modulation technology to realize the locking reference signal of the laser frequency. By detecting the single photon acetylene gas absorption spectrum and by amplifying the lock-in the discrete single photon response pulse, we achieve the laser frequency stabilized in real time. The 1.5 μm distribution feedback semiconductor laser output frequency is stabilized at acetylene gas absorption peaks, and the typical laser frequency fluctuation is less than 25 MHz within 175 s. This single photon wavelength modulated absorption spectrum technology eliminates the high background noise in low frequency range and can be used in the quantum communication system and optical wavelength division multiplex.

Keywords: single photon modulation, absorption spectrum, stabilized

PACS: 42.60.Fc, 42.62.-b, 42.79.-e

* Project supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant Nos. 2012CB921603, 2010CB923103), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174187, 61178009, 60908019, 10934004), NSFC Project for Excellent Research Team (Grant No. 60821004), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2011091016), TSTIT and TYMIT of Shanxi, and Shanxi Province Foundation for Returned Scholars.

[†] E-mail: xlt@sxu.edu.cn