

文章编号: 1001-3806(2016)04-0461-05

## 可时序控制的激光功率稳定系统

张 枢<sup>1,2</sup>, 金尚忠<sup>1</sup>, 范夏雷<sup>1,2</sup>, 李 焯<sup>2,3</sup>, 林百科<sup>2,3</sup>, 林弋戈<sup>2\*</sup>, 方占军<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310038; 2. 中国计量科学研究院 时间频率计量研究所, 北京 100013; 3. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

**摘要:** 在铯原子光晶格钟实验中, 为了应对多变的实验环境和复杂的实验需求, 使得某些光路中的激光不仅能够保证功率稳定, 还可以进行时序性调控, 采用了声光调制的方法, 基于声光晶体的衍射效率随加载于其上的射频功率变化而变化这一原理, 建立了一套反馈控制系统, 实现了激光功率的主动稳定以及功率设定值的时序性可控。结果表明, 在该系统中激光会根据时序控制信号稳定地工作在控制范围内的任意功率强度上, 与无功率稳定的状态相比, 激光功率的稳定度从  $10^{-2}$  量级提高到了  $10^{-4}$  量级。该系统的特点在于能够对功率进行稳定的时序控制。

**关键词:** 激光技术; 激光功率稳定; 声光调制; 时序控制; 伺服反馈

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.001

## Laser power stabilization systems with time sequence control

ZHANG Shu<sup>1,2</sup>, JIN Shangzhong<sup>1</sup>, FAN Xiaolei<sup>1,2</sup>, LI Ye<sup>2,3</sup>, LIN Baiko<sup>2,3</sup>, LIN Yige<sup>2</sup>, FANG Zhanjun<sup>2</sup>

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310038, China; 2. Research Division of Time and Frequency, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China; 3. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to cope with changeable environment and complex requirements of strontium optical lattice clock experiments, laser power should be stabilized and controlled in time sequence in some laser paths. Acousto-optic modulation was adopted to stabilize the laser power based on the principle that diffraction efficiency of acousto-optic crystal varies with the change of driving radio frequency power. A feedback control system was established to realize active stabilization of laser power and timing control of power. The result shows that laser power can be set at arbitrary levels within its setting range according to time sequence. When the control system is enabled, the relative laser power stability is improved from  $10^{-2}$  to  $10^{-4}$  compared with the disabled state. The advantage of the system is power stability with timing control.

**Key words:** laser technique; laser power stabilization; acousto-optic modulate; timing sequence control; servo feedback

### 引言

自 20 世纪激光问世以来, 由于激光拥有的良好单色性、相干性等特点, 在许多科学领域中例如高精度的测量、远距离的信号传播、原子的冷却和囚禁以及工业印刷等方面都有了广泛和深入的应用。在以上的种种应用中, 激光器的功率不可避免地会随着时间的、温度、机械振动、湿度等等外界因素的变化而产生随机性波动<sup>[1-2]</sup>。为了避免激光功率的不稳定因素对实验或者工作产生的不利影响, 国内外学者都对此开展了研究, 并取得了一定成果。其中具有代表性的功率稳定方法主要有两大类: 一类是从激光器的内部结构出发对激

光的功率进行被动稳定, 包括调整激光器的驱动电流、稳定激光器的内部结构、控制并稳定激光器的频率等等方法<sup>[3-4]</sup>, 国际上这类稳定方法的激光功率稳定度一般能达到  $10^{-2}$  量级<sup>[5-6]</sup>; 另一类则是通过对激光器输出的激光进行外部主动控制, 往往通过电光调制<sup>[7]</sup>、声光调制<sup>[8]</sup>、量子阱调制<sup>[9]</sup>等方式对激光器的光束进行调制并形成反馈回路。由于该类方法的整个系统都搭建在激光器外部, 并不影响激光器的本身, 因此第 2 类方法的适用范围较第 1 类方法更广, 对于以上所述的大部分产生光功率随机起伏的情况都能够有效抑制, 实际操作起来也更为便利。从理论上来说, 这类方法一般可以使得激光光束功率的稳定度达到  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  量级<sup>[10-11]</sup>。

在本文中, 基于系统中已经存在的声光调制装置, 利用其 1 级衍射光功率随着驱动功率大小的变化而变化的特点<sup>[12]</sup>, 建立闭环的伺服控制系统对激光的功率

作者简介: 张 枢 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究为与激光有关的计量以及测量。

\* 通讯联系人。E-mail: jinsz@cjlu.edu.cn

收稿日期: 2015-06-02; 收到修改稿日期: 2015-06-24

进行反馈控制,将其稳定在设定的工作功率。与其它激光功率稳定系统不同,为了满足铽原子光晶格钟实验的需求<sup>[13]</sup>,作者进一步实现了对激光功率进行时序控制的情况下,在不同时刻把激光功率稳定在不同的设定值。

### 1 基本原理

声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)是激光调制器的一种。声光效应产生的原因是当作为弹性波的声波作用在声光晶体上时,它会在声光晶体内部产生周期性的疏密度变化,等于改变了声光介质的折射率,使得介质内部的折射率有了周期性的变化。对进入该介质的空间光而言,该介质等效于一个相位光栅。于是当激光作用在这一光栅上,会发生衍射现象。通过改变超声场的频率和功率,可以改变衍射光的频率以及强度。根据这一原理,人们设计出了声光调制器、声光偏转器、声光移频器等声光器件<sup>[14]</sup>。在本文中,利用了AOM来调整激光1级衍射光的功率,通过伺服控制系统调整AOM驱动射频信号功率的大小,控制衍射光的功率,得到功率稳定的1级或者-1级衍射光。由AOM的基本原理可知,在一定的范围内驱动射频信号的功率越高,衍射光的功率也会更大。为了达到利用AOM对激光功率进行调制的目的,作者设计了带有功率调制端口的AOM驱动器,其原理框图如图1所示。

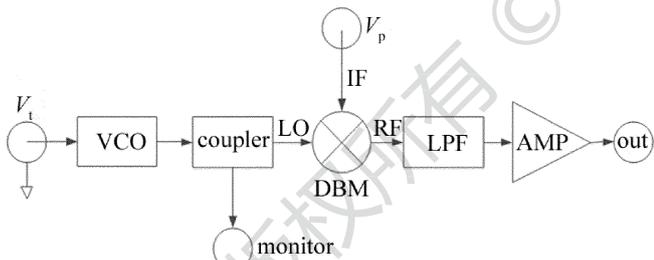


Fig. 1 Schematic diagram of AOM driver

在图1中, $V_1$ 是用来控制压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)产生特定频率的控制电压。通过调节 $V_1$ 的电压, VCO可以产生150MHz~400MHz的射频信号。该射频信号经过定向耦合器后被分成功率不等的两个信号。功率较小的一路信号通过监视端输入到计数器中,利用计数器可以准确读出AOM驱动射频信号的频率,从而对AOM驱动输出射频信号的频率进行调控。另一路功率较大的信号进入双平衡混频器(double balanced mixer, DBM)的本振(local oscillator, LO)端,由中频(intermediate frequency, IF)端输入的可变电压 $V_p$ 信号控制衰减倍数,射频(radio frequency, RF)端输出衰减后的射频信号。

对该系统进行实际监测后得到该信号的功率最大值与最小值之间的差达到了35dB。低通滤波器(low-pass filter, LPF)会滤掉高频的噪声信号,最后信号将经功率放大器(amplifier, AMP)之后输出至AOM上,最高能输出功率为2W的射频信号。

设激光器进入AOM前的光功率为 $P_{in}$ ,经过衍射后的1级衍射光功率为 $P_o$ 。很容易可以得到: $P_o = kP_{in}$ ,其中 $k$ 为激光经过AOM后的1级衍射光的衍射效率。1级衍射光的功率 $P_o$ 与控制电压 $V_p$ 的实测关系如图2所示,黑点为实际测量得到的数据,实线通过对数据拟合得到。

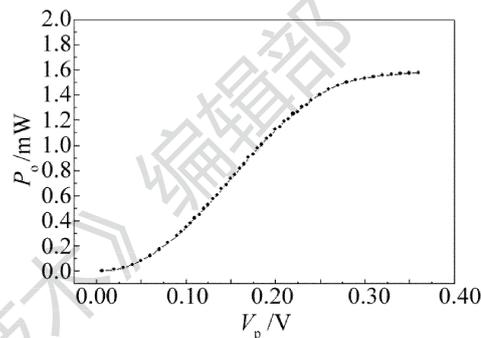


Fig. 2 The first order diffraction light power of an AOM

通过光功率计测得 $P_{in} = 3mW$ ,通过图2可得衍射效率 $k$ 的取值范围在0%到50%之间,可以由加在AOM驱动器功率调制端口上的电压 $V_p$ 控制。

为稳定激光的功率,需要功率伺服控制系统,其基本原理如图3所示。AOM 1级衍射光的功率由光电探测器(photodetector, PD)接收,设PD输出的电压信号为 $V_A$ ,将这一信号与另一可调电压信号 $V_s$ 进行比较,两者相差得到误差信号 $V_e$ :

$$V_e = V_s - V_A \quad (1)$$

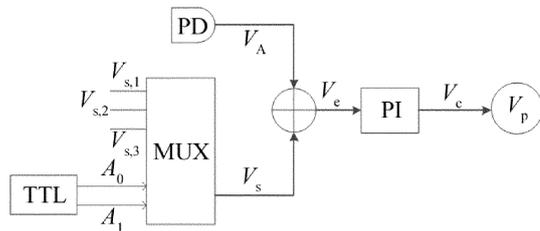


Fig. 3 Schematic diagram of timing control

将这一误差信号根据伺服系统的参量设定加上一定的增益后得到控制信号 $V_c$ 。其表达式如下:

$$V_c = V_e \frac{K2\pi f_{PI}}{s} \left( 1 + \frac{s}{2\pi f_{PI}} \right) \quad (2)$$

式中, $K$ 是比例-积分(proportional-integral, PI)控制器中的增益旋钮所调节到的值, $f_{PI}$ 是该控制器中拐点PI corner档的所选择的档位数值。从(1)式、(2)式中可以发现, $V_c$ 是一个随着 $V_A$ 不断进行调整的可变电压,令 $V_p = V_c$ ,利用这一可变电压对AOM的衍射效率进

行控制。经过多次的迭代,  $V_s$  将逐渐趋于一个较为稳定的值, 使  $V_p$  的波动保持为一个较小的值, 对激光的功率进行了稳定。此时若在不同的时间范围内设置不同的  $V_s$  值, 根据(1)式、(2)式推导得到在这些不同的时间范围内  $V_s$  也会有不同的值, 相对应地也会输出稳定在不同功率的激光。

为了能用时序信号控制激光工作在不同的功率并且保持特定时间激光功率的稳定, 需要用逻辑电平信号(transistor-transistor logic, TTL)控制  $V_s$  的值, 为此设计了与功率稳定伺服系统相结合的时序控制系统, 其具体原理如图 3 所示。从  $A_0, A_1$  输入时序信号, 根据选择器(multiplexer, MUX)的原理, 当  $A_0 = 0, A_1 = 0$  时, 输出的  $V_s = V_{s,1}$ ;  $A_0 = 0, A_1 = 1$  时,  $V_s = V_{s,2}$ ;  $A_0 = 1, A_1 = 0$  时,  $V_s = V_{s,3}$ 。

如图 3 所示, 可以通过设定时序控制信号, 使得激光时序性的工作在这 3 个设定的功率值。进而只要调整并增加  $V_s$  的设定值, 增加时序信号的输入端, 该系统就能够时序性地输出可调范围内任意功率的稳定激光。

## 2 实验装置

本次实验中选用了波长为 689nm 的外腔半导体激光器(external-cavity diode laser, ECDL)作为激光光源, 该 ECDL 和驱动供电箱由中国计量科学研究院自主研发, 实验中激光器的驱动电流为 70mA。

本次实验的基本装置和原理如图 4 所示, 首先由 ECDL 出射一束波长为 689nm 的激光, 通过一个  $\lambda/2$  波片、一个光隔离器(optical isolator, ISO)以及一个反射镜进入了 AOM(AA MT200-B 100A 0.5-VIS)进行调制。其中的 ISO 可以隔离光反馈, 消除反射光对激光器模式影响。通过调节反射镜可以调节激光入射进入 AOM 的角度, 确保获得较高衍射效率的 1 级衍射光。通过对 AOM 驱动射频信号进行开启和关断, 产生的 1

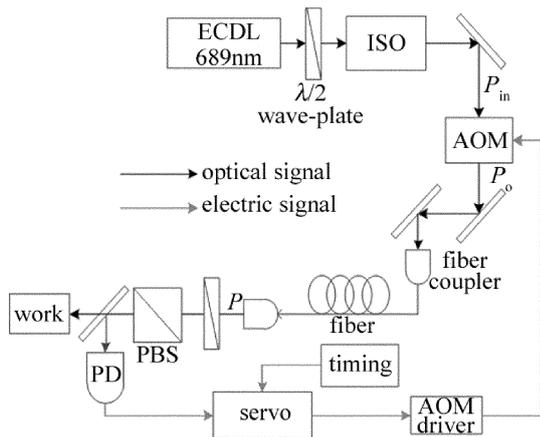


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

级衍射光也会随之开启和关断, 而 0 级光却不会, 通过这一特点可以确认衍射光的级次。在本次实验中驱动 AOM 的射频信号是由 AOM 的驱动模块提供, 作者设计并搭建了利用压控振荡器、耦合器、功放等元器件所组成的 AOM 驱动。在实验中, 将输出的射频信号的频率设定为 200MHz, 即 +1 级衍射光较 0 级光进行了 +200MHz 的频移。

接下来, 衍射光通过一对反射镜进行光纤耦合, 两个反射镜的组合可以调节激光的左右偏移和俯仰角度, 使得激光通过一个光纤耦合器进入一条 8m 长的保偏光纤, 激光在光纤中的传递会因为光纤抖动和偏振方向等原因而引入一定激光功率抖动之后利用第 2 个光纤耦合器得到功率为  $P$  的空间光, 该激光通过一个偏振分光镜(polarizing beam splitter, PBS)后, 被光学取样器分成了两束。一束将用于实际的工作需要, 另一束则通过 PD 转换为电信号完成进入稳定功率的伺服系统(New Focus LB1005), 形成反馈回路。与此同时加在 timing 上的 TTL 时序信号, 将控制伺服系统中的设定电压  $V_s$ , 对激光工作的功率进行时序性的控制。最后为了测量激光功率的稳定度, 利用数字电压表(KEITHLEY 2700)对 PD 的电压信号进行测量以及记录, 或者通过示波器观察输出的激光是否按照时序信号进行工作。

## 3 实验结果与分析

搭建好上述的实验装置之后, 由数字电压表测量记录 PD 探测的电压信号  $U$ , 根据光功率  $P = gU$ , 这里的  $g$  是激光的功率和电压表测得电压的互相换算系数。由于在本文中 PD 探测得到电压值与激光的功率是成线性的正比关系, 因此只要测量 PD 输出的电压数值, 校准后即可计算得到激光的功率数值。图 5 是反馈回路闭合前后的激光功率稳定曲线, 在  $a$  点前(0s ~ 900s)未闭合反馈回路,  $a$  点后(900s ~ 2000s)时间段内反馈回路闭合。数字电压表测量的时间间距为每 2s 测量一次 PD 的输出电压。观察图 5 发现, 在前半

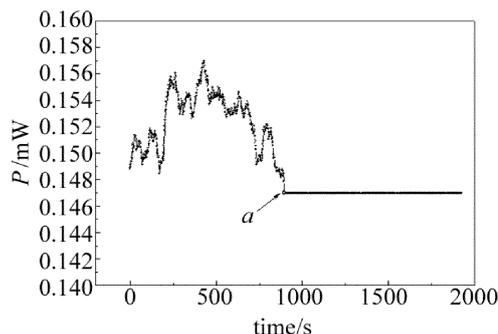


Fig. 5 Comparison of the stability of laser power when the control system is disabled and enabled

段也就是并未闭合反馈回路的时间内,曲线的抖动较大,对应的激光的稳定度较低。而在 900s 后闭合了反馈回路后,激光的功率由于伺服系统的控制明显地趋于长时间的稳定状态。由于主动功率伺服系统是通过调节驱动 AOM 的射频功率衰减来实现光功率调节的,因此稳定后的输出功率设定点只能设定在  $P_{\min}$  以下,  $P_{\min}$  为未稳定功率前的激光功率的最小值,从图 5 也可以看出,稳定后的激光功率比未稳定前的平均功率低。为了更加精确地比较这两者之间的区别,下面作者分别计算闭合反馈回路前后这两段曲线分别所对应的激光功率的稳定度。根据国家标准的激光功率稳定度(不稳定度)计算方法<sup>[15]</sup>:

$$\Delta P_1 = \frac{2\Delta P_\delta}{P} \times 100\% \quad (3)$$

式中,

$$\Delta P_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中,  $n$  代表这一段时间内的采样点数,  $P_i$  是每一个采样点所对应的功率,  $\bar{P}$  是以上所有采样点的平均功率。

根据激光功率和 PD 探测所得的电压  $U$  成线性关系,可以发现:

$$P_i = gU_i \quad (5)$$

$$\bar{P} = g\bar{U} \quad (6)$$

式中,  $U_i$  是每一个采样点所对应的电压,  $\bar{U}$  是以上所有采样点的平均电压。

将(4)式、(5)式、(6)式带入(3)式后,就可以得到:

$$\Delta P_1 = \frac{2\Delta U_\delta}{U} \times 100\% \quad (7)$$

式中,

$$\Delta U_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}} \quad (8)$$

计算后得到前半段曲线即反馈回路未启动时的稳定度为 2.8729%,而在 900s 后启动了反馈回路后,激光功率的稳定度到达了 0.0126%,比起之前的稳定度提高了两个数量级,到达了  $10^{-4}$  量级。

通过 TTL 时序信号可以控制系统输出 3 个不同的设定电压  $V_{s,1}, V_{s,2}, V_{s,3}$ , 由时序信号控制这 3 个设定电压每一个都维持 500ms, 并且循环往复。通过电位器可以控制 3 个设定电压的具体值,间接控制激光功率稳定在相对应的设定值。为了观察激光此时功率的具体变化,通过示波器 PD 探测到的电压进行了观察,得到如图 6 所示的波形。

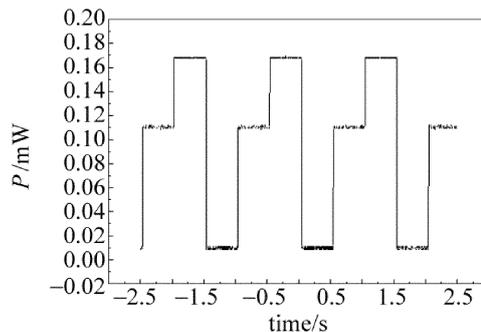


Fig. 6 Laser power with timing control

观察图 6 容易发现,输出的波形是一个周期为 1.5s 的波形,激光在时序信号的控制下周期性的工作在不同的功率值。在每一个周期内,激光的功率值主要分布在 3 个不同的数值上,在每个数值的保持时间为 500ms,这与之前设定电压的保持时间相对应。根据这一分析,可以确定激光稳定的功率值是由设定电压  $V_s$  所控制的,并且随着  $V_s$  的变化,激光输出的功率也会跟着发生变化,得到如图 6 所示的波形。因此,利用电位器控制各个  $V_s$  的值,并且通过 TTL 信号控制设定电压  $V_s$  的切换,就可以控制激光稳定在实验需要的功率设定值,并且能够按照实验要求进行时序的控制,这对于铯原子二级激光冷却中需要切换冷却光功率的应用是非常重要的。

#### 4 结论

设计了一种带有时序控制能力的激光功率稳定系统,能有效地抑制激光功率的漂移。实验中,通过对激光功率的反馈伺服控制,可以将激光功率的稳定度保持在 0.01% 左右。与其它类似的功率稳定系统相比,本文中设计的系统可以通过对激光功率进行时序控制,在不同的时刻将激光稳定在不同的设定功率上。在诸如铯原子激光冷却以及其它一些实验研究中,需要激光能在不同的时间段内稳定在不同的功率上,本文中的系统利用时序控制实现了这一功能,具有便于修改、输入简单、搭建快速等优点。本文中设计的带有时序控制能力的激光功率稳定系统对于复杂的实验环境和多变的实验条件有着良好的适用性,为需要时序调控稳定激光的实验研究提供了技术基础。

#### 参考文献

[1] CARVAJAL J, CHEN G, OGMEN H. Fuzzy PID controller; design, performance evaluation, and stability analysis[J]. Information Sciences, 2000, 123(3/4): 249-270.  
 [2] DU J J, LI W F, LI G, et al. Intensity noise suppression of light field by optoelectronic feedback[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(18): 3443-3445.  
 [3] ZHOU Z, WANG F, YANG Z, et al. The study of optical power control for driving circuit using the 650 nanometer low power semiconduc-

- tor laser[C]//2013 International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC). New York, USA: IEEE, 2013: 222-224.
- [4] IVERSON E W, FENG M. Transistor laser power stabilization using direct collector current feedback control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(1): 4-6.
- [5] SASAKI A, HAYASHI T. Amplitude and frequency stabilization of an internal-mirror He-Ne laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1982, 21(10): 1455-1456.
- [6] ARAKI T, NAKAJIMA Y, SUZUKI N. Frequency and intensity stabilization of a high output power, internal mirror He-Ne laser using interferometry[J]. Applied Optics, 1989, 28(8): 1525-1528.
- [7] GAO Z H, LI J Z, MA D, *et al.* Laser power stability system by electro-optical modulator [J]. Laser Journal, 2000, 21(2): 20-21 (in Chinese).
- [8] JIN G, WEN X, YANG B D, *et al.* Laser intensity stabilization by using of opto-electronic feedback control based on an acousto-optical frequency-shifting system [J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 235-239 (in Chinese).
- [9] SHOOP B L, PEZESHKI B, GOODMAN J W, *et al.* Laser-power stabilization using a quantum-well modulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(2): 136-139.
- [10] KÖHLER R, GOEBEL R, PELLO R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometers at the highest accuracy[J]. Metrologia, 1996, 33(6): 549-550.
- [11] YAO H J, LU Z, LI Z Q. Study on high precision laser beam power stabilizer[J]. Acta Metrologica Sinica, 2000, 21(3): 161-166 (in Chinese).
- [12] LI M, LI G C. Experimental investigation of acoustooptic effect[J]. Applied Optics, 2005, 26(6): 23-27 (in Chinese).
- [13] WANG Q. Laser cooling and trapping of strontium atoms[D]. Beijing: Division of Electricity and Quantum Metrolog, 2010: 45-49 (in Chinese).
- [14] HAO A H, MAO Z L, GE H B. The study of acousto-optic technology in the field of laser technology[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2005, 10(3): 111-114 (in Chinese).
- [15] CHEN G. GB/T 13863-2011 Test methods for laser radiation power and its instability[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011: 1-10 (in Chinese).