

# FPGA 在 319 nm 波长单频紫外激光系统锁频中的应用

苏雯静<sup>1</sup>, 卫怡荣<sup>1</sup>, 侯晓凯<sup>1</sup>, 王越伟<sup>1</sup>, 何军<sup>1, 2</sup>, 王军民<sup>1, 2, \*</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, 太原 030006

2. 极端光学协同创新中心, 山西大学, 太原 030006)

**摘要:** 窄线宽、可连续调谐的单频 319 nm 紫外激光系统对铯原子的单步里德堡激发有重要意义。以高精度超稳光学腔作为频率标准, 结合射频调制边带的 PDH 锁频技术、电子学边带锁频技术、无调制 HC 锁频技术, 实现 319 nm 单频紫外激光系统频率的锁定。然而传统反馈锁定系统存在的结构较复杂、体积较庞大、成本较高等明显缺点, 本文中通过利用 FPGA 代替信号发生器、锁相放大器、PID 模块、示波器等分立器件实现激光频率的锁定, 对传统的反馈锁定系统进行简化和升级; 基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡, 利用 PDH 锁频技术以及电子学边带锁频技术对基频光进行锁定, 并对射频调制边带的 PDH 锁频技术和无调制的 HC 锁频技术对四镜环形倍频腔的锁频效果进行比较。FPGA 的应用, 在实验操作中不仅能够大大降低成本、简化实验系统, 并且充分节约使用空间, 带来了极大的便利, 有着较高的集成度、高度灵活性、良好稳定性。

**关键词:** 现场可编程门阵列(FPGA); 319 nm 单频紫外激光; PDH 锁定; 电子学边带锁定; HC 锁定

## 0、引言

紫外激光波长短、单光子能量大、空间分辨率高, 对原子里德堡激发有重要意义<sup>[1-4]</sup>, 可用于铯原子进行单光子跃迁一步直接里德堡激发至  $nP_{3/2}$  态(主量子数  $n = 70\sim 100$ ), 以及里德堡弱缀饰基态的铯冷原子的制备, 进一步可应用于原子之间的量子纠缠制备和微弱直流电场及低频电场的精密测量<sup>[13-15]</sup>。然而关于连续稳定的高功率紫外激光的制备仍然是量子光学领域中较大的挑战, 随着激光技术的飞速发展, 紫外波段激光的实现成为可能。2011 年, Wilson 等人首次提出通过两光纤激光源通过各自的光纤放大器后, 通过单次穿过和频晶体以及谐振腔倍频的方式得到紫外波段激光 313 nm 达 750 mW, 用于磁光阱中铍离子的激光俘获与冷却<sup>[5]</sup>; 2014 年, Lo 等人获得 1.9 W 的 313 nm 紫外激光<sup>[6]</sup>; 2014 年, 墨西哥大学 Hankin 等人成功制备紫外波段激光 319 nm 达 1.9 W, 首次用于铯原子单步里德堡激发<sup>[7]</sup>; 2016 年, 杜伦大学 Bridge 等人制备得到 230 mW 宽调谐的紫外波段激光, 用于获得铯原子的里德堡激发光谱<sup>[8]</sup>; 2016 年, 荷兰阿姆斯特丹大学 Rengelink 等人利用 2 W 的 319 nm 紫外波段激光, 用于实现 He 原子魔术波长光学偶极阱<sup>[9]</sup>。

---

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.12474483), 山西省基础研究计划资助项目(No.202403021211013), 国家重点研发计划课题(2021YFA1402002)和山西省 1331 工程重点学科建设项目资助的课题

**作者简介:** 苏雯静 (1998—), 女, 汉族, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术。E-mail: 202222607057@email.sxu.edu.cn

†**通讯作者:** 王军民, E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

我们在实验上制备了窄线宽、可连续调谐的 319 nm 单频紫外激光系统<sup>[10-11]</sup>，以高精度超稳光学腔作为频率标准，结合 PDH 锁频技术(Pound Drever Hall)<sup>[16-23]</sup>、电子学边带锁频技术<sup>[12]</sup>、HC 锁频技术(Hansch Couillaud)<sup>[24]</sup>，实现对 319 nm 紫外激光系统的频率锁定。传统反馈锁定方式需要信号发生器、锁相放大器、比例积分控制器（PID）、示波器等一系列器件，整个反馈锁定过程需要较多的分立器件<sup>[16-18]</sup>，占用空间大、操作起来复杂、且费用成本较高；随着集成电路技术的发展，现场可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)是用来更新传统锁频系统不错的选择<sup>[25-29]</sup>，FPGA 内部包括可配置逻辑模块（CLB）、输出输入模块（IOB）和内部连线三个部分，工作原理是使用硬件描述语言（HDL）进行描述，然后通过编译和综合过程转化为门级网表；这些网表被映射到 FPGA 的可用资源上，生成比特流，该比特流在 FPGA 上电时加载到设备中，来配置 FPGA 执行预定的功能。21 世纪，FPGA 已具备数字信号处理器等模块<sup>[30-31]</sup>，国内外基于原子谱线或光学腔频率标准，利用 FPGA 对半导体激光器或光学腔进行频率稳定的实验研究，都已取得了一定的进展。2020 年，**达姆施塔特理工大学** Preuschhoff 等人基于 STEMLab 平台，研究了一套数字激光频率稳定和强度稳定控制系统<sup>[32]</sup>。2022 年，**柏林洪堡大学** Wiegand 等人利用 FPGA 开发了 Linien，研究了两种自动锁定算法进行稳频，并自主优化光谱参数<sup>[33]</sup>。2023 年，**山西大学**张天才老师组张沛等人利用 FPGA，基于饱和吸收光谱技术，将半导体激光器输出激光锁定在铯原子的超精细跃迁线上，80 s 内频率起伏为 3 MHz<sup>[34]</sup>；同年，**新加坡国立大学** Avalos 等人也基于 FPGA 研究了低相位噪声半导体激光器的数字频率稳定<sup>[25]</sup>。2024 年，**山西大学**张天才老师组郭成哲等人利用 FPGA 对光纤环形谐振腔的共振频率进行了锁定<sup>[35]</sup>。Red Pitaya 的 FPGA 板卡内集成了多种功能模块，减少了对外部组件的需求，降低了系统的运行成本；相比于其他集成电路，有更高的效率、更低的功耗、开发周期较短，能够实现快速修改和更新。此外，FPGA 具有超强灵活性、可编程性、抗干扰能力，在包括线通信、军事和航空航天、医疗、工业自动化、计算机在内的多个领域具有较好的应用前景，是未来技术发展的一个较好方向。

本文利用 Red Pitaya 的 FPGA 板卡，通过板中的 IQ 模块、ASG 模块、PID 模块、Switch 模块、Scope 模块代替传统锁定的众多分立器件，完成频率扫描、调制解调、反馈锁定，以及信号监测，我们将 319 nm 紫外激光系统与 FPGA 相结合，搭建基于 FPGA 的 319 nm 紫外激光系统频率锁定系统，基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡对 1560 nm、1077 nm 频率以及四镜环形倍频腔进行锁定，降低仪器的操作复杂度，简化激光系统，实现了系统的小型化，也节约了实验空间与成本。

## 1、实验装置

锁定的实验装置如图 1 所示。和频过程，窄线宽 1560 nm 分布反馈式掺铒光纤激光器(DFB-EDFL @ 1560 nm) 作为种子光源分为两束，一束光注入到 15 W 掺铒光纤放大器(EDFA @ 1560 nm) 构成 MOPA 系统，另一束光注入高精度光学超稳腔(ATFilms)，基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡并利用 PDH 锁频技术将 1560 nm 将激光频率锁定到高精度光学超稳腔上；窄线宽 1077 nm 分布反馈式掺镱光纤激光器(DFB-YDFL @ 1077 nm)作为种子光源注入 5 W 掺镱光纤放大器(YDFA @ 1077 nm)构成第二套 MOPA 系统。

合束后激光单次穿过周期性极化掺氧化镁铌酸锂晶体(PPMgO:LN)和频产生 638 nm 红光，将其分成两束，较弱的一束激光注入高精度光学超稳腔，基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡，利用电子学边带锁频技术将 638 nm 激光频率锁定到高精度光学超稳腔上；剩余的

大功率 638 nm 红光注入到领结型四镜环形倍频腔中，该倍频腔总腔长  $L=616$  mm，折叠角  $10.7^\circ$ ， $57.1^\circ$  双布斯特角切割的 BBO 晶体长度  $d=10$  mm，由平面反射镜 M1、M2 和曲率半径为 100 mm 的凹面反射镜 M3、M4 组成，反射镜 M1 同时为输入耦合镜，透射率  $T_1$  为 2.2%，M2、M3、M4 镀有对基频光 637.2nm 高反射膜，反射率大于 99.9%，平面镜 M2 粘在压电陶瓷上用于锁定四镜环形腔腔长；基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡对该倍频腔进行锁定，并比较 PDH 锁频技术、HC 锁频技术两种方法的锁定效果，实现 638 nm 在四镜环形腔中的共振增强，产生 319 nm 紫外连续激光。利用三个 FPGA 板卡可以同时实现 1560 nm 激光、1077 nm 激光、四镜环形倍频腔的频率锁定，并通过交互机连接到电脑端。

通过短光纤延时声光频移自差拍法对 1560 nm 掺铒光纤激光器和 1077 nm 掺镱光纤激光器的激光线宽进行测量。将激光分为两束，一路经过声光调制器移频 80 MHz，另一路经过长度为 5.1 km 的光纤延时，合束后送入射频频谱分析仪中提取拍频谱中相干包络的相关信息拟合得到激光线宽，当光纤延时时间大于激光线宽相干时间的 6 倍时，测量结果更为准确。通过拟合得到 1560 nm 光纤激光器线宽约为 450 Hz，1077 nm 光纤激光器约为 1.8 kHz。

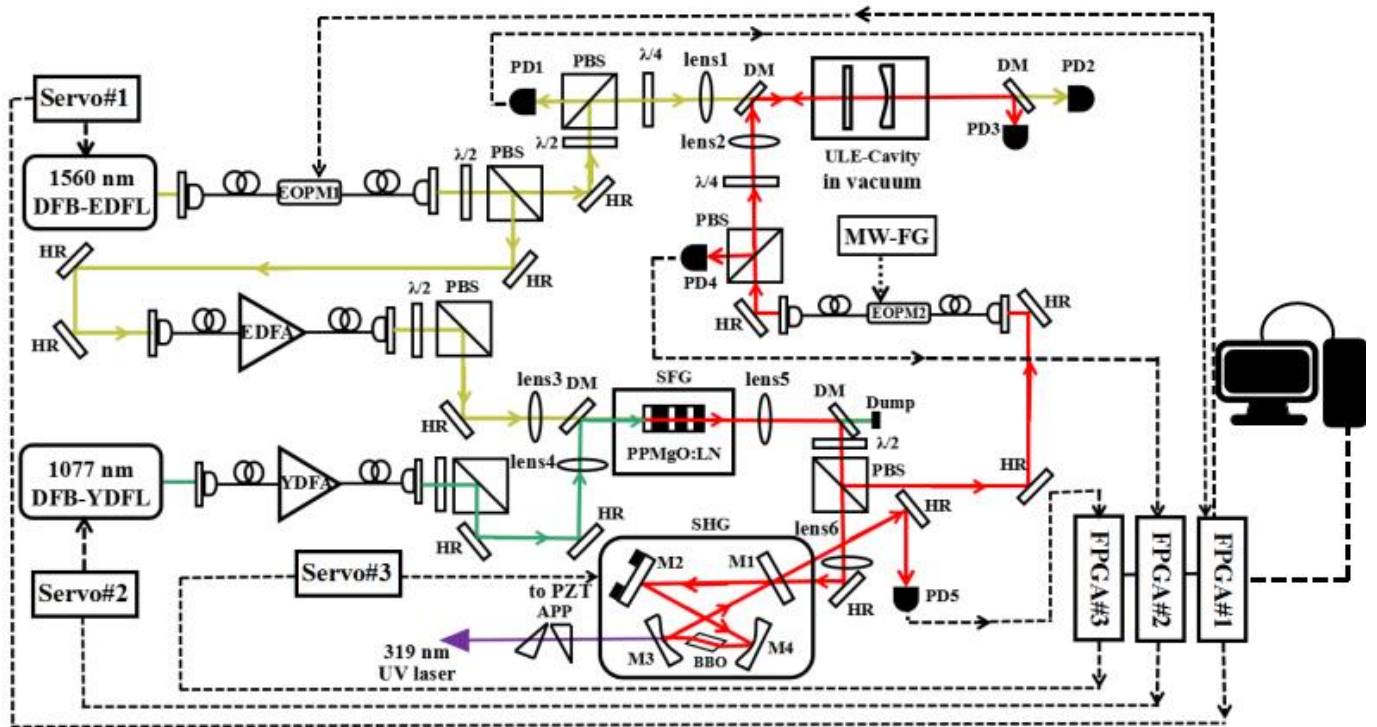


Fig. 1 Experimental setup

图 1. 实验装置图

DFB-EDFL: distributed feedback erbium-doped fiber laser; DFB-YDFL: distributed feedback ytterbium-doped fiber laser; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; YDFA: ytterbium-doped fiber amplifier; EOPM: electro-optical modulator; HR: high reflectivity mirror;  $\lambda/2$ : half wave plate;  $\lambda/4$ : quarter wave plate; PBS: polarized beam splitter cube; PD: photodiode; DM, dichroic mirror; ND: neutral density filters; ULE cavity: ultralow ultra-stable expansion high-finesse cavity; M1, M2, M3, M4: SHG cavity mirrors; APP, anamorphic prism pair; PZT, piezoelectric transducer; MW-FG: microwave function generator; RF-FG: radio frequency function generator.

DFB-EDFL: 分布反馈式掺铒光纤激光器; DFB-YDFL: 分布反馈式掺镱光纤激光器; EDFA: 掺铒光纤激光放大器; YDFA: 掺镱光纤激光放大器; EOPM: 电光相位调制器; HR : 高反镜;  $\lambda/2$  : 半波片;  $\lambda/4$ : 四分之波片; PBS : 偏振分束棱镜; PD : 光电探测器; DM: 双色镜; ND: 衰减片; ULE cavity: 超低膨胀系数高精度超稳光学腔; M1, M2, M3, M4: 倍频腔镜; APP: 整形棱镜对; PZT: 压电陶瓷; MW-FG: 微波信号源; RF-FG: 射频信号源。

图 2 为 Red Pitaya FPGA 板卡的实物图, STEM125-14 的主控芯片采用 Zynq-7010 架构, 由 Artix-7 系列的 FPGA 芯片和 Cortex-A9 双核处理器组成, 具备可编程性和信号处理能力。STEM125-14 拥有两个高速模数转换(A/D)和数模转换(D/A)接口, 采样率为 125 Msps, 分辨率为 14 Bit, 可输入和输出电压范围为-1 V ~ +1 V 的电信号, 共有 2 个输入端口 Input 1、Input 2 以及 2 个射频输出端口 Output 1、Output 2, 在 PyRPL 中输出调制频率达 62 MHz。STEMlab125-14 可以通过无线网与客户端应用程序进行实时交互。软件操作主要基于 STEMlab125-14 硬件平台的开源 PyRPL 软件包, 实现许多数字电压信号处理模块以及模块之间的互连。开源 PyRPL 软件包还提供图形客户界面, 可以对各模块的各个参数进行件操作主要基于 STEMlab125-14 硬件平台的开源 PyRPL 软件包, 实现许多数字电压信号处理模块修改, 能够通过 Python 编写的图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 在计算机上修改模块参数进行实验, 并且用户可以根据自己的应用需求, 对 FPGA 编程定义、设计专用的频率锁定算法和逻辑。

实验中, 我们对激光系统的锁定分为扫描阶段和锁定阶段。扫描阶段时, 通过 ASG 模块提供三角波进行从 Output 1 端口输出到压电陶瓷 PZT, 扫描腔长得到腔模信号, 腔的透射信号通过端口 Input 1 输入, 在 Scope 模块上进行监测; 腔的反射信号通过端口 Input 2 输入 IQ 模块, 并从 Output 2 端口输出到 EOM 给信号提供调制信号, 解调得到鉴频信号, 也在 Scope 模块上进行观测; 锁定阶段时, 通过 Switch 模块将 ASG 模块的扫描关闭, 并将 IQ 模块的信号输入 PID 模块, 反馈信号通过 Output 1 输出到高压直流放大器, 并反馈到压电陶瓷 PZT 来完成锁定。

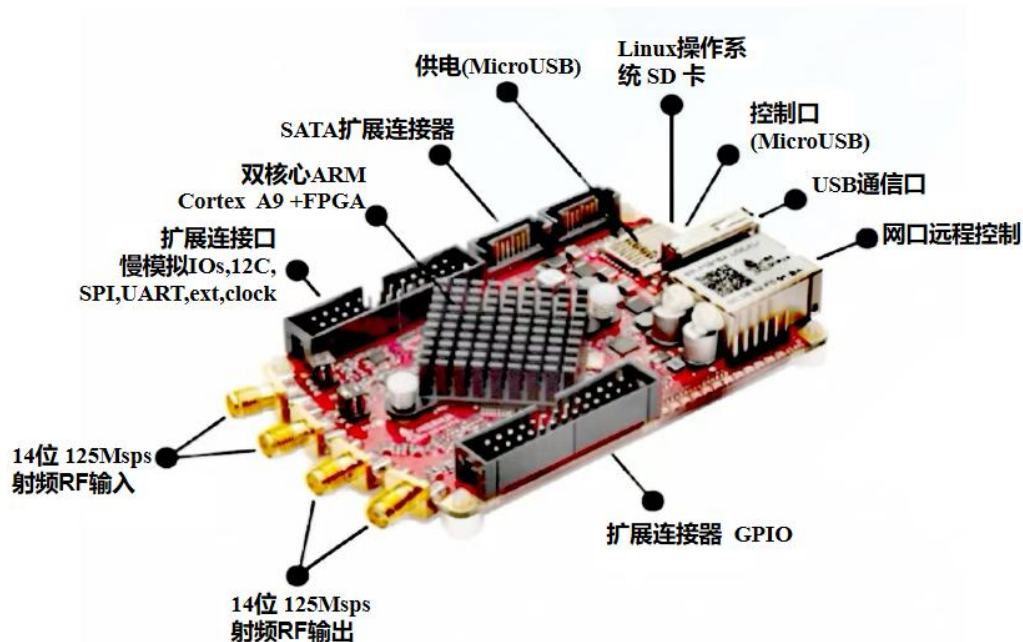
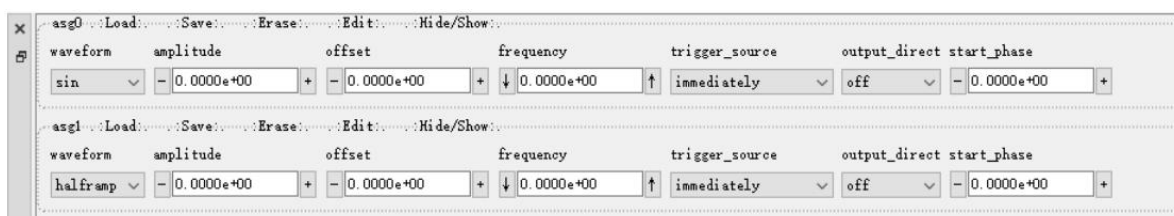


Fig. 2 Model STEMlab125-14 Red Pitaya FPGA board photo

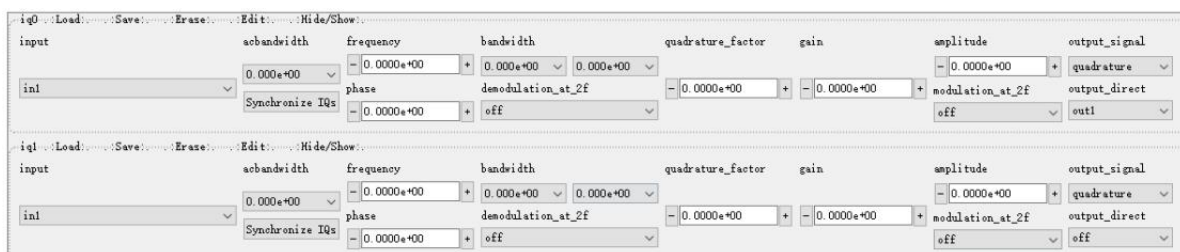


图 2. STEMLab125-14 型 Red Pitaya FPGA 板卡照片

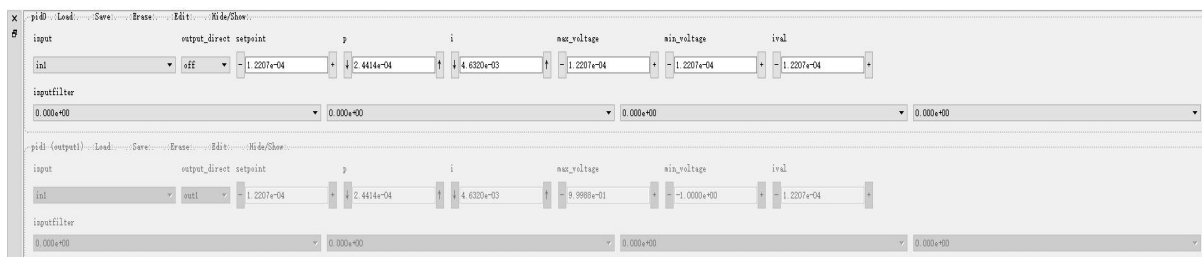
图 3 分别为 Red Pitaya 板卡内模块的界面设置图。(a) 为 ASG 模块的界面设置图, waveform 可以选择波形, 包括三角波、正弦、余弦等; amplitude 能够设置信号的幅度大小; frequency 能够设置信号的频率大小; trigger source 用于设置触发源; start phase 用于设置输出信号的相位。(b) 为 IQ 模块的界面设置图, frequency 用于设置输出正弦信号的频率; amplitude 用于设置正弦调制信号的幅度; phase 设置输出正弦信号的相位; acbandwidth 为高通滤波器, 对输入信号进行滤波; bandwidth 为低通滤波器, 用来设置滤波器的截止频率, 实现低通滤波器、高通滤波器以及组合实现带通滤波器; quadrature factor 为正交参量大小, 用于对经过滤波器至 output signal 端的信号放大; gain 用于对经过滤波器至 output direct 端的信号放大; 通过对 IQ 模块的参数调整, 能够获得信号调制解调后的误差, 用于后续激光频率锁定。(c) 为 PID 模块的界面设置图, setpoint 为参考值; p 为比例增益系数; i 为积分增益系数, max\_voltage 和 min\_voltage 对应设定的最大、最小的反馈电压; ival 是 pids 模块运算得到的偏差值, 最高可达  $\pm 4\text{ V}$ ; inputfilter 为滤波器的截止频率; 通过调整 PID 模块的参数实现激光频率的锁定。



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 module interface settings of Red Pitaya. (a) ASG module interface settings; (b) IQ module interface settings; (c) PID module interface settings.

图 3. Red Pitaya 板卡模块的界面设置图。(a) ASG 模块界面设置图; (b) IQ 模块界面设置图; (c) PID 模块界面设置图。



图 5. 1560 nm 激光锁定结果。(a) 扫描状态下的腔透射信号和误差信号；(b) 锁定后 10 min 内的典型残余频率起伏。

### 3、四镜环形倍频腔的 FPGA 锁定

#### 3.1 射频调制边带的 PDH 方案锁定倍频腔

基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡，利用射频调制边带的 PDH 方案对四镜环形倍频腔频率进行锁定，从而实现 638 nm 在四镜环形腔中的共振增强，简化实验光路如图 6 所示，ASG 模块的扫描频率 25 Hz，扫描幅度 0.5 V，倍频腔的自由光谱区  $FSR$  为 439.5 MHz，腔线宽  $\delta$  为 3 MHz，精细度  $F = FSR / \delta = 146$ ，空间模式匹配效率约 95%，线性损耗为  $L = 1.8\%$ ，晶体非线性转换系数  $E_{nl} = 1.38 \times 10^{-6} / W$ ，输入耦合镜透射率  $T_1$  为 2.2%，基本达到光学阻抗匹配。基于 PDH 技术进行锁定，对腔的反射光小功率取样，通过 IQ 模块加调制频率 30 MHz，调制幅度 0.25 V，得到鉴频信号如图 7(a) 所示，伺服反馈实现锁定后 10 min 内的频率起伏为  $\pm 0.425$  MHz，如图 7(b) 所示；通过对误差信号进行快速傅里叶变换，得到该信号的频谱，如图 7(c) 所示。

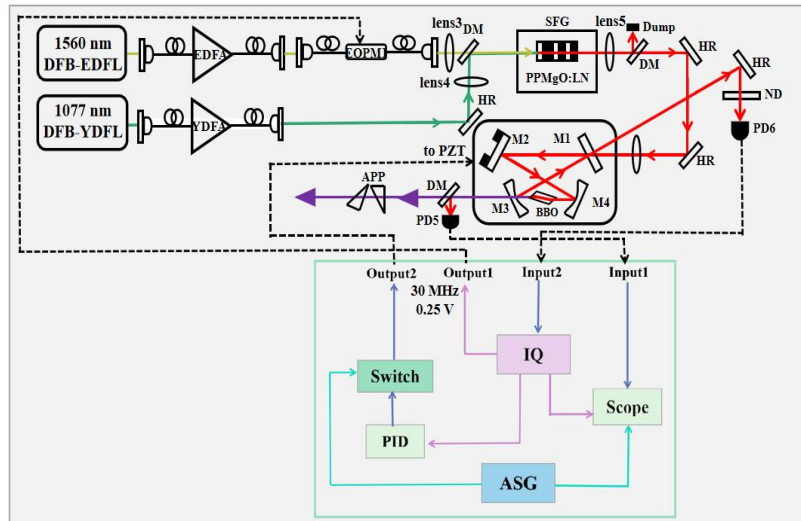


Fig . 6 Simplified experimental setup of a four-mirror frequency doubling ring cavity locking via the PDH scheme

图 6 . PDH 方案锁定四镜环形倍频腔的简化装置图

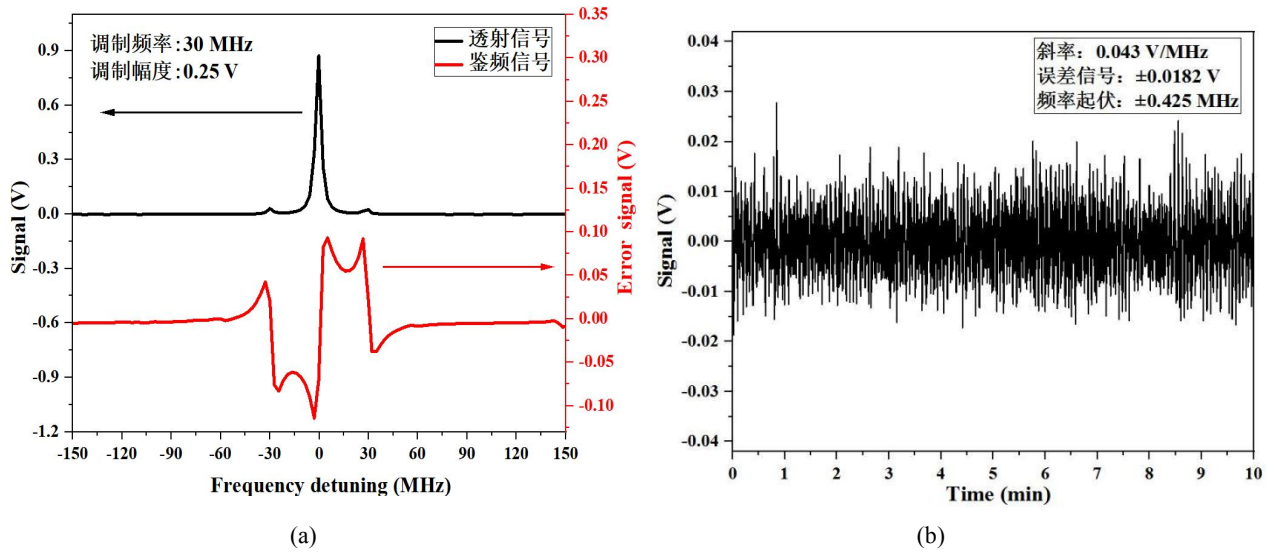


Fig.7 PDH scheme locking results. (a) Cavity transmission and error signals corresponding to the PDH scheme; (b) Typical residual frequency fluctuation within 10 minutes after locking via the PDH scheme.

图 7. PDH 方案锁定结果。(a) PDH 方案对应的腔透射信号和误差信号；(b) PDH 方案锁定后 10 min 内典型残余频率起伏。

### 3.2 无调制 HC 方案锁定倍频腔

基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡，利用无调制 HC 方案对四镜环形倍频腔频率进行锁定，从而实现 638 nm 在四镜环形腔中的共振增强，简化实验光路如图 8 所示，BBO 晶体在 HC 技术中有偏振元件的作用，对腔的反射光小功率取样差分探测得到对应的鉴频信号，腔的透射信号和反射光差分探测所得鉴频信号如图 9(a)所示，所得到的鉴频信号从 Input2 通道进入 IQ 模块，在 Scope 模块监视并输入 PID 模块，伺服反馈锁定后 10 min 内的频率起伏为  $\pm 0.612$  MHz，如图 9(b)所示；通过对误差信号进行快速傅里叶变换，得到该信号的频谱，如图 9(c) 所示。

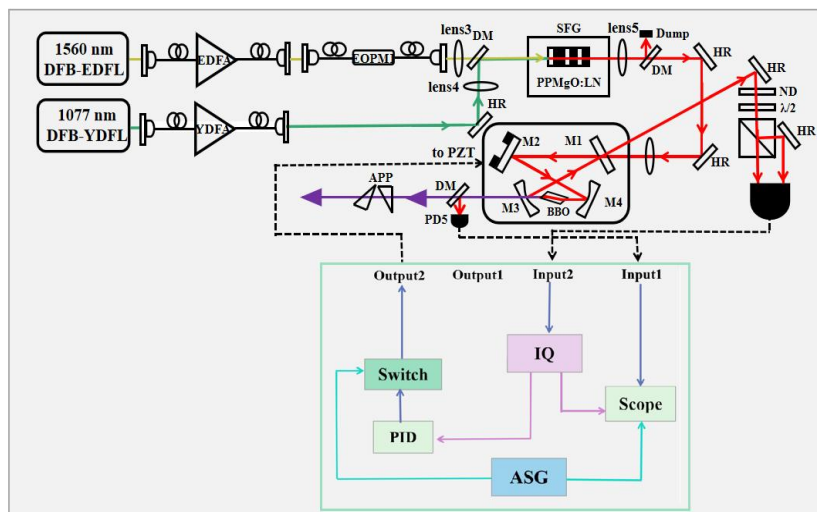


Fig. 8 Simplified experimental setup of a four-mirror frequency doubling ring cavity locking via the HC scheme



图 8. HC 方案锁定四镜环形倍频腔的简化装置图

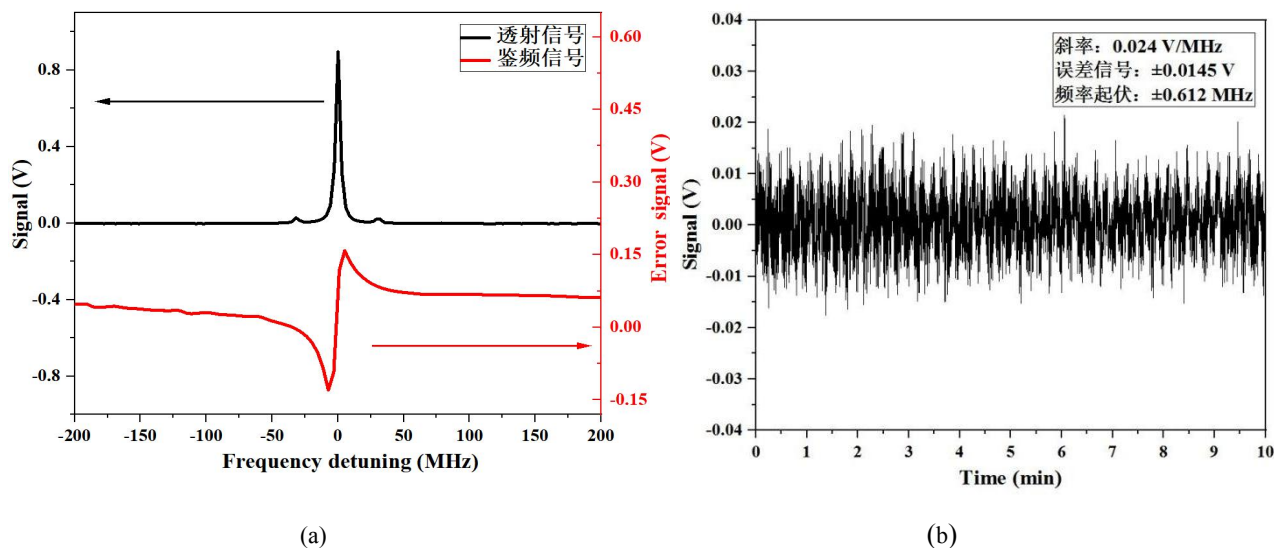


Fig. 9 HC scheme locking results. (a) Cavity transmission and error signals corresponding to the HC scheme; (b) Typical residual frequency fluctuation within 10 minutes after locking via the HC scheme.

图 9. HC 方案锁定结果。(a) HC 方案对应的腔透射信号和误差信号；(b) HC 方案锁定后 10 min 内典型残余频率起伏。

### 3.3 两种方案的对比

关于射频调制边带的 PDH 方案和无调制 HC 方案实现四镜环形倍频腔的锁定，PDH 方案 and HC 方案都属于主动稳频，即把单频激光器的频率与某个稳定的参考频率相比较，当振荡频率偏离参考频率时，产生一个正比于偏离量的误差信号，这个误差信号经放大后又通过反馈系统返回来控制腔长，使振荡频率回到标准的参考频率上，实现稳频。射频调制边带的 PDH 方案是通过位相调制器对激光频率进行调制，激光产生两个幅度相等、相位相反的一阶边带的信号，输出腔信号与相移后的调制信号混频，经过低通滤波后得到误差信号的技术，它的优点是获得的信号信噪比以及稳定性较好，但其锁定光路较为复杂，需要外加调制信号；无调制 HC 方案是通过测量腔对光偏振态的变化来获得误差信号的技术，它的优点是所需的光路比较简单、无需加调制，输出的倍频光功率更加稳定，但由于无需加调制，使得获得的误差信号含有噪声信号，信噪比不高，同时这种方法在实验过程中调节时较为复杂。PDH 方案在 10 min 内的锁定频率起伏为  $\pm 0.425$  MHz，HC 方案在 10 min 的锁定频率起伏为  $\pm 0.612$  MHz，PDH 方案稳频效果更佳。

## 4、638 nm 激光频率的 FPGA 锁定

基于电子学边带锁频技术，利用 FPGA 集成电路板将和频所得 638 nm 激光频率锁定到置于超高真空、精密控温、超低膨胀系数的高精细度光学超稳腔的共振峰上，从而实现和频基频光 1077 nm 激光频率的锁定。基于 Red Pitaya 的 FPGA 板卡锁定 638 nm 激光频率的简化实验光路如图 10 所示。与 PDH 锁频技术不同的是，电子学边带锁频技术将微波信号源与射频信号源合束，加载至 EOPM 上，由此来调制出一级边带及其电子学边带，随后再利用 PDH 技术将 638 nm 激光频率锁定。电子边带产生原理如图 11(a) 所示：ASG 模

块的扫描频率 25 Hz、扫描幅度 0.2 V，利用微波信号源 MW-FG 给电光相位调制器 EOPM2 相位调制，调制频率为  $\Omega_1=15$  MHz、调制幅度  $\beta_1=2.58$  V，它又被 IQ 模块提供的调制频率为  $\Omega_2=1.2$  MHz、调制幅度  $\beta_2=1$  V 的信号相位调制，在 Scope 模块观测到腔的透射信号以及对应的鉴频信号，如图 11(b) 所示；优化  $P$  和  $I$  参数实现 638 nm 激光的频率锁定，并且对应的频率起伏较小，锁定后 10 min 内所对应的频率起伏为  $\pm 0.175$  MHz，如图 11(c) 所示；通过对误差信号进行快速傅里叶变换，得到该信号的频谱，如图 11(d) 所示。

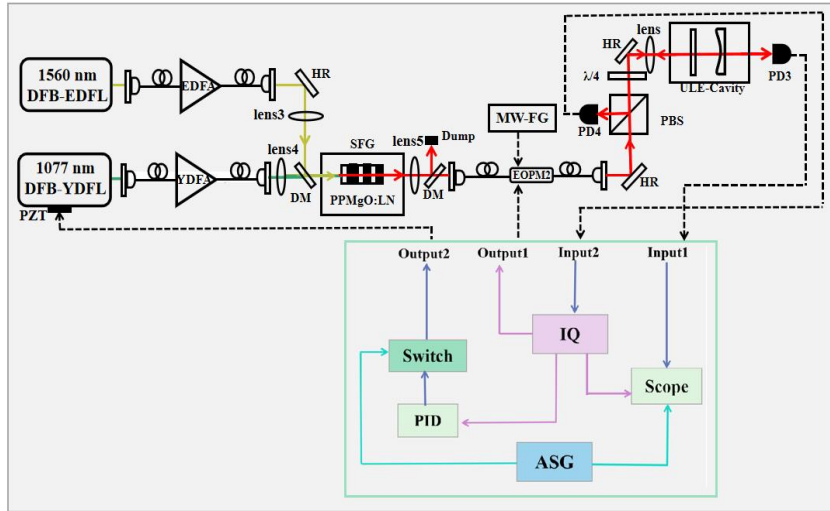
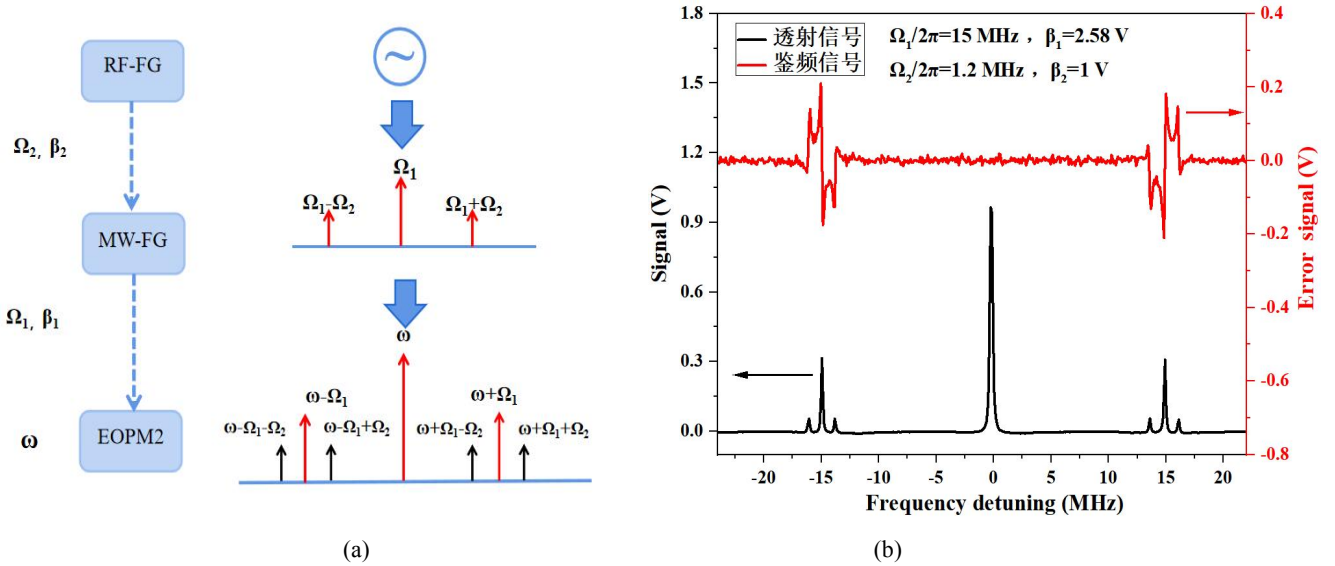


Fig. 10 Simplified the experimental setup of locking 638 nm laser

图 10. 锁定 638 nm 激光简化装置图



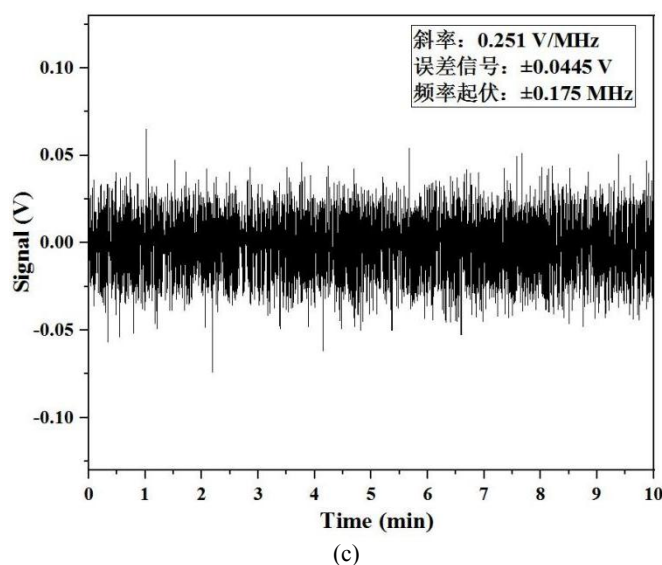


Fig. 11 638 nm laser locking results. (a) Schematic diagram of the principle; (b) Cavity transmission and error signals when the laser frequency is scanned; (c) Typical residual frequency fluctuation within 10 minutes after locking.

图 11. 638 nm 激光锁定结果。(a) 原理示意图；(b) 扫描状态下的腔透射信号和误差信号；(c) 锁定后 10 min 内典型残余频率起伏。

## 5、结论与展望

本文通过 FPGA 实现 319 nm 整个紫外光系统的频率锁定，通过 Red Pitaya 的 FPGA 板卡实现频率扫描、调制解调、反馈控制以及监测，利用板中的 IQ 模块、ASG 模块、PID 模块、Switch 模块、Scope 模块替代传统设备，利用射频调制边带的 PDH 技术、电子学边带技术同时实现 1560 nm、1077 nm 激光频率的锁定，并比较了射频调制边带的 PDH 锁定技术和无调制 HC 锁定技术对四镜环形倍频腔的锁频效果，PDH 技术锁定后频率起伏为  $\pm 0.425$  MHz，HC 技术锁定后频率起伏为  $\pm 0.612$  MHz，两者相比较，PDH 方案的锁定效果更佳，并且能够实现更宽范围的频率连续扫描。

在实现激光频率锁定的基础上，继续对锁定结果进行优化，使得锁定后的频率起伏更小。PID 模块是整个频率锁定过程的关键， $P$  参数和  $I$  参数会对锁定结果存在影响，并且初始时的激光功率大小、调制幅度也对频率起伏大小有影响，为此我们可以继续对  $P$  参数、 $I$  参数、激光功率大小、调制信号幅度分别进行优化；在优化过程中，某一个参数逐一改变，并保持其余几个参数取值不变，比较所得的频率起伏大小，均选择最佳参数值，使得整个紫外激光系统的锁定效果更佳。除此外，我们还可以进一步对高压放大器的放大倍数、调制频率大小、Red Pitaya 板卡内低通滤波参数、高通滤波参数、正交参量大小等因素进行优化来实现整个激光系统更好的锁定。

FPGA 以其开发周期短、低能耗、高效率、高灵活性、高集成性、稳定性、可编程性、抗干扰能力等等的优点被广泛应用，在整个科学研究，尤其是量子光学、原子物理领域有广阔的发展前景和应用前景。在基于 FPGA 实现 319 nm 紫外激光系统的锁定后，我们可以基于 FPGA，使用 AOM 反馈控制来抑制强度噪声，实现激光功率的稳定；并且可以通过消除色差、改变和频晶体温度、改变光子数消耗比来优化单次穿过和频晶体效率，提升 638 nm

激光功率；并继续优化四镜环形倍频腔输入耦合镜透射率、光学阻抗匹配等提高谐振倍频效率，获得高功率的紫外激光；在此基础上，基于 FPGA 利用高功率的 319 nm 紫外光用于热原子里德堡激发光谱、冷原子里德堡激发、冷原子里德堡弱缀饰基态等过程；除此外，我们可以使用更高性能、成本较高的 Red Pitaya 的 FPGA 板卡，使得锁定效果更加稳定，从而很好的实现整个激光系统的锁定。

#### 参考文献:

- [1] Vasilyev S, Nevsky A, Ernsting I, Hansen M, Shen J, and Schiller S. Compact all-solid-state continuous-wave single-frequency UV source with frequency stabilization for laser cooling of Be<sup>+</sup> ions. *Appl. Phys. B*. 2011, 103, 27–33. DOI 10.1007/s00340-011-4435-1.
- [2] Thoumany P, Hänsch T, Stania G, Urbonas L, and Becker T. Optical spectroscopy of rubidium Rydberg atoms with a 297 nm frequency-doubled dye laser. *Opt. Lett.* 2009, 34, 1621 – 1623.
- [3] Koelemeij J C J, Hogervorst W, and Vassen W. High-power frequency-stabilized laser for laser cooling of metastable helium at 389 nm. *Rev. Sci. Instrum.* 2005, 76, 033104. DOI:10.1063/1.1865752.
- [4] Tong D, Farooqi S M, Stanojevic J, Krishnan S, Zhang Y P, Côté R, Eyler E E, and Gould P L. Local blockade of Rydberg excitation in an ultra-cold gas. *Phys.Rev. Lett.* 2004, 93, 063001. DOI:10.1103/PhysRevLett.93.063001.
- [5] Wilson A C, Ospelkaus C, VanDevender A P, Mlynek J A, Brown K R, Leibfried D and Wineland D J. A 750 mW, continuous-wave, solid-state laser source at 313 nm for cooling and manipulating trapped <sup>9</sup>Be<sup>+</sup> ions. *Appl. Phys. B*. 2011, 105, 741–8. DOI 10.1007/s00340-011-4771-1.
- [6] Lo H Y, Alonso J, Kienzler D, Keitch B C, Clercq L E, Negnevitsky V, and Home J P. All-solid-state continuous-wave laser systems for ionization, cooling and quantum state manipulation of beryllium ions. *Appl. Phys. B*. 2014, 114, 17-25. DOI 10.1007/s00340-013-5605-0.
- [7] Hankin A M, Jau Y Y, Parazzoli L P, Chou C W, Armstrong D J, Landahl A J, and Biedermann G W. Two-atom Rydberg blockade using direct 6S to nP excitation. *Phys. Rev. A*. 2014, 89, 033416. DOI:10.1103/PhysRevA.89.033416.
- [8] Bridge E M, Keegan N C, Bounds A D, Boddy D, Sadler D P, and Jones M P A. Tunable cw UV laser with <35 kHz absolute frequency instability for precision spectroscopy of Sr Rydberg states. *Opt. Express*. 2016, 24, 2281-2292. DOI:10.1364/OE.24.002281.
- [9] Rengelink R J, Notermans R P M J W, and Vassen W. A simple 2 W continuous-wave laser system for trapping ultracold metastable helium atoms at the 319.8 nm magic wavelength. *Appl. Phys. B*. 2016, 122, 122-129. DOI 10.1007/s00340-016-6395-y.
- [10] Wang Jie-ying, Bai Jian-dong, He Jun, Wang Jun-min. Realization and characterization of single- frequency tunable 637.2 nm high-power laser. *Opt. Commun.* 2016, 370,150-155. DOI:10.1016/j.optcom.2016.02.067.
- [11] Wang Jie-ying, Bai Jian-dong, He Jun, Wang Jun-min. Development and characterization of a 2.2 W narrow-linewidth 318.6 nm ultraviolet laser. *J. Opt. Soc. Am. B*. 2016, 33,2020-2025. DOI:10.1364/JOSAB.33.002020.
- [12] Bai Jian-dong, Wang Jie-ying, He Jun , Wang Jun-min. Electronic sideband locking of a broadly tunable 318.6nm ultraviolet laser to an ultra-stable optical cavity. *J. Opt.* 2017, 19,045501. DOI:10.1088/2040-8986/aa5a8c.
- [13] Wang Jie-ying, Bai Jian-dong, He Jun, and Wang Jun-min. Single-photon cesium Rydberg excitation spectroscopy using 318.6-nm UV laser and room-temperature vapor cell. *Optics Express*. 2017, 25, 22510-22518. DOI:10.1364/OE.25.022509.



- [14] Bai Jian-dong, Wang Jie-ying, Liu Shuo, He Jun, and Wang Jun-min. Autler–Townes doublet in single-photon Rydberg spectra of cesium atomic vapor with a 319 nm UV laser. *Applied Physics B*. 2019, 125, 33. DOI:10.1007/s00340-019-7151-x.
- [15] 王军民, 白建东, 王杰英, 刘硕, 杨保东, 何军. 瓦级 319nm 单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子 Rydberg 激发. *中国光学*, 2019, 12, 701-718.  
[Wang Jun-min, Bai Jian-dong, Wang Jie-ying, Liu Shuo, Yang Bao-dong, He Jun.. Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms. *Chinese Optics*. 2019,12,701-718.(in Chinese). DOI:10.3788/CO.20191204.0701.]
- [16] Britzger M, Friedrich D, Kroker S, Brückner F, Burmeister O, Kley E B, Tünnermann A, Danzmann K, Schnabel R.. Pound-Drever-Hall error signals for the length control of three-port grating coupled cavities. *Applied Optics*. 2011, 50,4340-4346. DOI: 10.1364/AO.50.004340.
- [17] Spencer D T, Davenport M L, Komljenovic T, Srinivasan S, Bowers J E. Stabilization of heterogeneous silicon lasers using Pound-Drever-Hall locking to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ring resonators. *Optics Express*. 2016, 24,13511-13517. DOI: 10.1364/OE.24.013511.
- [18] Gatti D, Galzerano G, Janner D, Longhi S, and Laporta P. Fiber strain sensor based on a pi-phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique. *Optics Express*. 2008, 16,1945-1950. DOI: 10.1364/OE.16.001945.
- [19] Drever R W P, Hall J L, and Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, and Ward H. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Appl. Phys. B*.1983, 31, 97-105.
- [20] Black Eric D. An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization. *American Journal of Physics*. 2000,69,DOI: 10.1119/1.1286663.
- [21] Zeng Y, Fu Z, Liu YY, He XD, Liu M, Xu P, Sun XH, and Wang J. Stabilizing a laser frequency by the Pound-Drever-Hall technique with an acousto-optic modulator. *Applied Optics*. 2021, 60,1159-1163. DOI: 10.1364/AO.415011.
- [22] Wang X, Feng L, Xu J, and Ni P. Steady-state frequency-tracking distortion in the digital Pound-Drever-Hall technique. *Applied Optics*. 2020, 59,1347-1352. DOI: 10.1364/AO.379557.
- [23] Zeyen M, Affolter L, Abdou Ahmed M, Graf T, Kara O, Kirch K, Langenbach A, Marszalek M, Nez F, Ouf A, Pohl R, Rajamohan S, Yzombard P, Schuhmann K, Antognini A. Injection-seeded high-power Yb:YAG thin-disk laser stabilized by the Pound-Drever-Hall method. *Optics Express*. 2023, 31,29558-29572. DOI: 10.1364/OE.498023.
- [24] Hansch T W and Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity. *Optics Communications*. 1980, 35, 113162.  
DOI:10.1016/j.chaos.2023.113162
- [25] Avalos V, Nie X, Yang A, He C, Kumar S, and Dieckmann K. Field-programmable-gate-array-based digital frequency stabilization of low-phase-noise diode lasers. *Review of Scientific Instruments*. 2023, 94,063001. DOI: 10.1063/5.0152305.
- [26] Liu Yinyu, Xiong Hao, Dong Chunhui, Zhao Chaoyang, Zhou Quanfeng, and Li Shun. Real-time signal processing in field programmable gate array based digital gamma-ray spectrometer. *Review of Scientific Instruments*. 2020, 91,104707. DOI: 10.1063/5.0005694.
- [27] Underwood K J, Jones A M, and Gopinath J T. FPGA-based phase control of acousto-optic modulator Fourier synthesis system through gradient descent phase-locking algorithm. *Applied Optics*. 2015, 54,5624-5628. DOI: 10.1364/AO.54.005624.
- [28] 杨海钢, 孙嘉斌, 王慰. FPGA 器件设计技术发展综述. *电子与信息学报*. 2010,32(3):714–727.  
DOI:10.3724/SP.J.1146. 2009.00751.

- [Yang H G, Sun J B, and Wang W. Overview of the Development of FPGA Device Design Technology. *Journal of Electronics and Information Technology*. 2010, 32,714-727. (inChinese). DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00751.]
- [29] Roy A, Sharma L, Chakraborty I, Panja S, Panja, S, Ojha V N, and De S. An FPGA based all-in-one function generator, lock-in amplifier and auto-relockable PID system. *Journal of Instrumentation*. 14,P05012. DOI: 10.1088/1748-0221/14/05/P05012.
- [30] Yang Yuchen, Shen Zhongtao, Zhu Xing, Wang Ziqi, Zhang Gengyan, Zhou Jingwei, Jiang Xun, Deng Chunqing, and Liu Shubin. FPGA-based electronic system for the control and readout of superconducting quantum processors. *Review of Scientific Instruments*. 2022, 93,074701. DOI: 10.1063/5.0085467.
- [31] Zou Ding, Lin Changyu, and Djordjevic Ivan B. FPGA-based LDPC-coded APSK for optical communication systems. *Optics Express*. 2017, 25,3133-3142. DOI: 10.1364/OE.25.003133.
- [32] Preuschoff T, Schlosser M, and Birkl G. Digital laser frequency and intensity stabilization based on the STEMLab platform(originally Red Pitaya). *Review of Scientific Instruments*. 2020, 91,083001. DOI: 10.1063/5.0009524.
- [33] Wiegand B, Leykauf B, Jördens R, and Krutzik M. Linien: A versatile, user-friendly, open-source FPGA-based tool for frequency stabilization and spectroscopy parameter optimization. *Review of Scientific Instruments*. 2022, 93,063001. DOI: 10.1063/5.0090384.
- [34] 张沛, 王晨曦, 宋丽君, 胡裕栋, 李刚, 张鹏飞, 张天才等. 基于 FPGA 的半导体激光器稳频系统. *量子光学学报*. 2024, 30,011001.  
[Zhang Pei, Wang Chen-xi, Song Li-jun, Hu Yu-dong, Li Gang, and Zhang Peng-fei, ZHANG Tian-cai. Frequency stabilization system of semiconductor laser based on FPGA. *Journal of Quantum Optics*. 2024, 30,011001. (in Chinese). DOI: 10.3788/JQO20243001.1001.]
- [35] 郭成哲, 王晨曦, 周静, 李刚, 张鹏飞, 张天才. 基于 FPGA 的光纤环形谐振腔的频率控制. *量子光学学报*. 2025, 31,041001.  
[Guo Cheng-zhe, Wang Chen-xi, Zhou Jing, Li Gang, Zhang Peng-fei, and Zhang Tian-cai. Frequency locking of fiber ring resonator based on FPGA. *Journal of Quantum Optics*. 2025, 31,041001. (in Chinese). DOI:10.3788/JQO20253104.1001. ]

# Application of FPGAs in frequency locking of the 319-nm single-frequency ultra-violet laser system

SU Wen\_Jing<sup>1</sup>, WEI Yi\_Rong<sup>1</sup>, HOU Xiao\_Kai<sup>1</sup>, WANG Yue\_Wei<sup>1</sup>, HE Jun<sup>1,2</sup>,  
WANG Jun\_Min<sup>1,2†</sup>

- (1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Optical Quantum Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, 030006;
2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, 030006)

**Abstract: Objective:** The narrow-linewidth, continuously tunable single-frequency 319 nm ultraviolet laser system is of great significance for the single-step Rydberg excitation of cesium metal atoms. The use of high-precision ultra-stable optical cavity, combined with PDH frequency stabilization technology, electronic sideband frequency stabilization technology, and HC frequency stabilization technology, which realize the frequency locking of the single-frequency ultraviolet laser system. However, the structure of the traditional feedback locking system is more complex, the cost is higher, the volume is larger, and the whole process requires more components, the operation is more complex. Therefore, FPGA is used to simplify and upgrade traditional feedback locking systems

**Methods:** FPPA has the advantages of short development cycle, low energy consumption, high efficiency, high flexibility, high integration, high stability, programmability, anti-interference ability, and it has application prospects in the whole scientific research, especially in the field of quantum optics and atomic physics. Discrete original components such as oscilloscopes realize the locking of laser frequency, including frequency sweeping, moderation and demodulation, feedback control and monitoring through the Red Pitaya board, making the whole laser system simple. FPGA can not only greatly reduce the cost in the experiment, but also fully save the use of space, bring great convenience, and have high integration, high flexibility, stability and simple operation.

**Results and Discussions:** Based on the Red Pitaya board, the laser frequency is locked by using PDH frequency stabilization technology, electronic sideband frequency stabilization technology and HC frequency stabilization; The frequency locking effect of PDH frequency stabilization technology and HC frequency stabilization technology of the four-mirror annular frequency doubling cavity is compared, the frequency fluctuation after PDH technology locking is  $\pm 0.425$  MHz within 10 minutes, and the frequency fluctuation after HC technology locking is  $\pm 0.61$  MHz within 10 minutes, the locking effect of PDH scheme is better, and it has a wider range of frequency continuous scanning.

**Conclusion:** In this paper, the laser frequency locking of the entire ultraviolet light system at 319 nm is realized based on the FPGA. the frequency sweeping, moderation and demodulation, feedback control, and monitoring can be realized through Red Pitaya, and the IQ module, ASG module, PID module, Switch

module, and Scope module in the board are used to replace the traditional equipment. Based on the Red Pitaya board, PDH locking technology and electronic sideband locking technology are used to achieve 1560 nm and 1077 nm laser frequency locking at the same time; and the frequency locking effect of PDH locking technology and HC locking technology on the four-mirror annular frequency doubling cavity was compared. FPGA realizes the simplification of the entire laser system, which can not only save space and cost, but also has excellent performance, improves the integration of the system, reduces the complexity of instrument operation, and is easier to operate.

**Keywords:** Field programmable gate array(FPGA); 319-nm single-frequency ultra-violet laser ; PDH frequency locking ; Electronic sideband locking; HC frequency locking