

# 激光稳频控制系统仿真与实验研究

伍越, 陈卫, 李泽禹, 姚峰, 朱涛

(中国空气动力研究与发展中心 超高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 窄线宽稳频半导体激光器在干涉测量、光学频标、精密光谱测量等研究领域有着广泛的应用; 自由运转的半导体激光器每天的频率漂移量可以达到 GHz, 因此研究半导体激光器的稳频具有十分重要的意义; 以 PDH 稳频为例, 基于 PLL 理论建立了激光稳频过程的数学模型, 计算了激光稳频过程的误差传递函数; 利用 Matlab/Simulink 搭建了激光稳频仿真模型, 分析了环境变化时激光器失锁机理, 结果表明控制电路内部信号可作为失锁判据; 进一步利用积分扫描方式搭建了一套激光器稳频试验系统, 针对环境因素的变化, 对激光器失锁过程进行了研究, 实验结果与仿真结果基本一致; 同时在稳频系统精密控温的情况下, 实现了对激光器长时间稳频, 其频率不稳定性小于 5 MHz。

**关键词:** 激光稳频; Pound-Drever-Hall 方法; PLL; 积分扫描

## Simulation and Experimental Studies on Laser Frequency Stabilization Control System

Wu Yue, Chen Wei, Li Zeyu, Yao Feng, Zhu Tao

(China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Semiconductor laser with narrow linewidth and high frequency stability has been widely used in interference measurements, optical frequency standard and precision spectroscopy. The daily frequency drift of a free running semiconductor laser can reach GHz level. Therefore, it is very important to study the frequency stabilization of semiconductor laser. In this paper, a mathematical model of laser frequency stabilization control system based on the phase locked loop (PLL) theory is proposed. The principle of lock-lose is been analysed and simulated by employing Matlab/Simulink. The result shows that the internal signal of the control circuit can be applied as the criterion of the lockout. Furthermore, an experimental phase-locking system is built with the integral scanning method to measure the actual locking performance. The good agreement of the results between the experiment and simulation presents that the theoretical model is reliable. Under the condition of precise temperature control, the laser shows excellent long-term frequency stabilities with a instability frequency below 5 MHz.

**Keywords:** frequency stabilization; Pound-Drever-Hall technique; PLL; integral scanning

## 0 引言

窄线宽稳频半导体激光器在精密干涉测量、光学频率标准和精密光谱测量等研究领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 这些领域对激光频率的稳定性有非常高的要求, 要求在数小时甚至几天内频率稳定在几个 MHz 甚至更小的范围内<sup>[4]</sup>, 而在半导体激光器自由运转时, 由于温度或机械震动的影响, 激光器折射率、谐振腔几何长度都会发生改变, 激光频率出现起伏和长期漂移, 频率移动范围可能达几个 GHz。如果半导体激光器频率起伏和漂移问题能够得到改善, 将会为半导体激光器开辟更加广阔的应用市场。为了抑制环境变化带来的影响, 通常把激光器频率锁定到稳定的参考频率上, 比较常用的是激光主动稳频技术<sup>[2,5]</sup>。激光主动稳频技术是通过参考频率和激光输出频率之间的误差, 产生反馈控制信号, 通过控制电路和高压放大后去驱动谐振腔

的压电陶瓷等光学相位控制元件, 动态的改变谐振腔长从而改变激光频率, 使其跟随参考频率, 达到稳频的目的。

随着技术的发展, 主动稳频技术的实现方式经历了模拟电路到数模混合电路的变迁。一般而言, 误差信号是由参考频率和激光输出频率通过“比较器”产生, 误差信号经过滤波放大之后会输入到一个 PID (比例、积分、微分) 模块, 利用积分器的动态跟踪能力, 同时综合比例放大、微分调节等部分得到一个适宜的反馈控制电压信号, 该反馈控制电压经过高压放大器就形成了驱动压电陶瓷的驱动电压。模拟电路中所有信号传递方式均为模拟信号, 数模混合电路中一般由模数转换芯片将原始信号转换为数字信号, 经由可编程逻辑器件或单片机处理后再输出控制电压。在外界扰动下, 电路处理中最常见的情况是模拟积分器或者模数转换器其电压会超出处理的范围, 这时整个稳频控制系统就不能再输出满足要求的驱动电压, 导致激光器频率失锁, 此时通常需要重置控制电路实现重新锁定。

目前较多的试验结果都表明利用激光主动稳频技术可以实现激光器的长期稳定, 但缺乏对激光稳频技术的理论分析。本文以 Pound-Dever-Hall (PDH) 方法为例, 讨

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573316)。

作者简介: 伍越(1992-), 男, 四川广安人, 硕士, 研究实习员, 主要从事光学非接触测量和激光技术等方向的研究。

论了激光器稳频系统锁相环回路的基本原理，建立了激光稳频系统的数学模型，仿真分析了稳频系统失锁的主要原因和判定依据，并利用随时间单调变化的温度环境，设计实验测量到了 PID 控制信号与系统误差信号的变化情况，对仿真结果进行了验证。最后实现了激光器的长时间稳频工作，输出光频率不稳定度达到 5MHz。

### 1 伺服控制原理

图 1 为一个典型的 PDH 稳频过程<sup>[6-7]</sup>。该稳频系统主要由：激光器、调制耦合系统、光学谐振腔、反馈控制电路等 4 个部分构成。激光器采用了 Toptica 公司的 DL100 外腔式半导体激光器，外腔半导体激光器主要通过压电陶瓷改变外腔反馈的长度，从而控制激光器输出频率，该激光器输出纵模单一，可避免光源本身对腔长锁定的影响。激光器输出的激光经过隔离器入射到光电相位调制器上，相位调制器在激光输出频率两侧调制一个边频带，调制后的激光入射到一个三角型环形谐振腔中，通过光电探测器收集到谐振腔反射信号后，与光电相位调制器调制的 25 MHz 本底信号进行混频滤波，得到 PDH 误差信号，该误差信号作为反馈控制电路的输入。系统中还使用了焦距为 100 mm 的透镜组以实现输出激光与环形谐振腔本征模式之间的匹配，最终实现调节激光器外腔长度使激光频率稳定在谐振腔的共振频率上的目的。PDH 稳频在锁定过程中对激光相位进行了射频调制，避开了幅度噪声，具有很强的抗干扰能力。

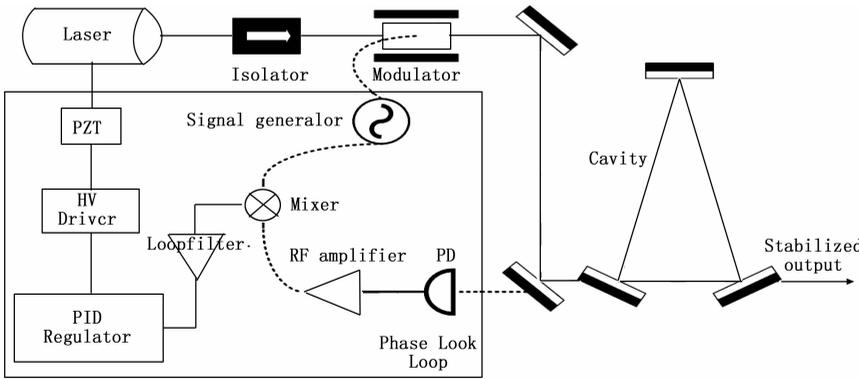


图 1 PDH 稳频实验装置

上述反馈控制过程类似于电子学中的锁相环。为此可以把激光稳频的过程，类比做一个标准的光学锁相环 (PLL)<sup>[8-10]</sup>，如图 2 (a) 所示。包含 4 个基本的功能模块：频率检测器、环路滤波器、PID 调节电路和压控振荡器 (VCO)。其中，频率检测器用于比较激光器输出相位和稳定腔模相位之间的相位差，是个相位比较器，通常由光探测器、混频器以及移相器等实现；环路滤波器一般为低通滤波器，能够有效滤除高频噪声，兼有改变锁相环路参数的作用；压控振荡器在这里即为激光器外腔，外腔长度可以通过一个压电陶瓷 (PZT) 调整。

对上述光学锁相环进行数学建模，如图 2 (b) 所示。

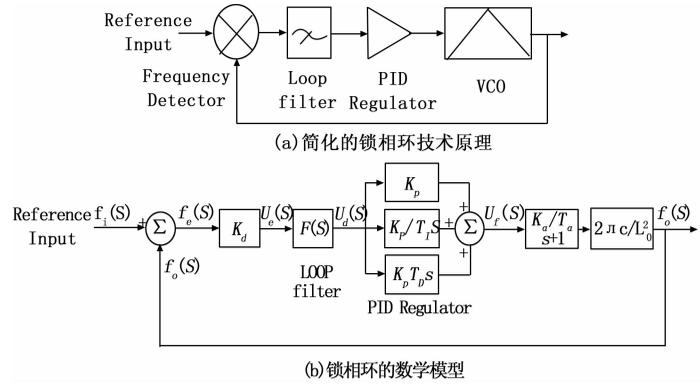


图 2 锁相环示意图

频率检测器的输出正比于输出频率与参考频率之差，复频域下频率检测器的输出可以表示为：

$$U_e(s) = k_d f_e(s) = k_d (f_i(s) - f_o(s)) \quad (1)$$

其中： $U_e(s)$  为检测器的输出信号， $k_d$  为检测器增益， $f_e(s)$  为频率误差信号， $f_i(s)$  和  $f_o(s)$  分别为参考频率和输出频率。

一般情况下，光学锁相环中使用的环路滤波器是一个低通滤波器。试验中用的一阶无源滤波器的传递函数可以写作<sup>[8]</sup>：

$$F(s) = \frac{1 + s\tau_2}{1 + s(\tau_1 + \tau_2)} \quad (2)$$

其中： $\tau_1$  和  $\tau_2$  为滤波器的时间参数。经环路滤波器滤波后的输出信号  $U_d(s)$  可以写为：

$$U_d(s) = \frac{1 + s\tau_2}{1 + s(\tau_1 + \tau_2)} U_e(s) \quad (3)$$

一般情况下，PID 调节电路的输出信号可以表示为：

$$U_f(s) = K_p (1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) U_d(s) \quad (4)$$

其中： $K_p$  为比例环节增益， $T_I$  为积分时间常数， $T_D$  为微分时间常数，PID 输出信号  $U_f(s)$  用以驱动压电陶瓷 (PZT) 动作。

激光器腔模由外腔腔长确定，假设外腔原始长度为  $L_0$ ，PZT 参与调节的长度为  $l(t)$ ，腔模频率  $f_o(t)$ <sup>[10-11]</sup> 可以表示为：

$$f_o(t) = \frac{2\pi c}{L_0 + l(t)} = \frac{2\pi c}{L_0} (1 + \frac{l(t)}{L_0})^{-1} \approx \frac{2\pi c}{L_0} (1 - \frac{l(t)}{L_0}) \quad (5)$$

令  $L(t) = L_0 - l(t)$ ，带入式 (5) 即：

$$f_o(t) = \frac{2\pi c}{L_0} (L_0 - l(t)) = \frac{2\pi c}{L_0} \cdot L(t) \quad (6)$$

对式 (6) 进行复频域变换，写作：

$$f_o(s) = \frac{2\pi c}{L_0} L(s) \quad (7)$$

$L(s)$  由 PZT 输入电压信号  $U_f(s)$  控制，可看作一个一阶延时装置<sup>[11]</sup>，故：

$$L(s) = (k_a / (T_a s + 1)) U_f(s) \quad (8)$$

其中:  $k_a$  为腔长调节增益,  $T_a$  为时间延迟参数。

如果假设激光频率已被锁定, 可以计算出系统的误差传递函数, 定义为频率误差信号与参考输入信号之比。

$$H_e(s) = \frac{f_e(s)}{f_i(s)} = \frac{s^2 L_0^2 T_a T_I + s L_0^2 T_I}{s^2 (L_0^2 T_a T_I + k T_I T_D) + s (L_0^2 T_I + T_I k) + k} \quad (9)$$

其中:  $k = 2\pi c K_a K_p K_d F(s)$ 。

## 2 稳频控制系统仿真

在实际系统中, 由于外界环境的变化会引起系统失锁, 比如机械振动、气流变化、温漂等<sup>[12]</sup>。在这些条件的影响下, 光学谐振腔参考频率会发生相应的变化, 为了保证激光器较好的稳频效果, 要求激光器输出频率能够跟踪参考频率的变化。在上述因素的影响下, 参考频率短时间内的变化可看作一个斜坡函数<sup>[13]</sup>。对此进行拉普拉斯变换, 得到  $f_i(s) = \Delta\omega / s^2$ ,  $\Delta\omega$  为频率跳变, 由此可计算出系统稳态误差:

$$\theta_e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{s^2} H_e(s) = 0 \quad (10)$$

故在环境发生变化时, 光学锁相环电路能够实时改变 PZT 控制电压, 使激光器输出频率与参考频率保持一致。根据实际情况, 利用 Matlab/simulink 软件对激光器稳频系统进行数值仿真, 仿真参数与实验参数保持一致, 为:  $k_d = 5/\pi$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 0.001$  s,  $K_p = 1$ ,  $T_I = 5$  s,  $T_D = 0.0005$  s,  $k_a = 0.000001$ ,  $T_a = 0.0001$ ,  $L_0 = 0.3$  m。

在激光器锁定情况下, 参考频率作斜坡函数变化时, 激光器输出与误差信号随时间的变化关系, 如图 3 所示。仿真过程中可以调节 PID 参数优化系统, 减小误差信号和激光器输出的起伏, 但为了能够分清参考输入和激光器输出, 图 3 中选择的参数并不是最优的。总体来看, 在激光器锁定的情况下, 激光输出频率能够较好的跟踪参考频率变化, 达到相对稳定的状态, PID 最优参数可参考仿真结果, 在实际系统中通过现场调节来选取。

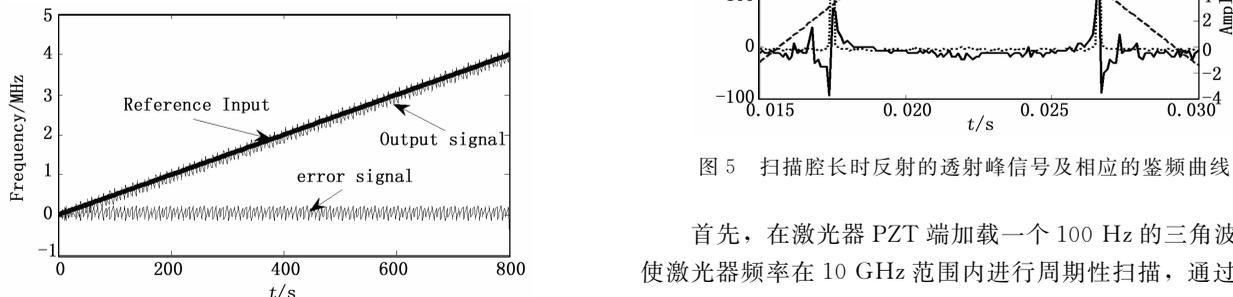


图 3 倍频腔锁定情况下参考输入、控制输出、误差信号图

在实际实验系统中, 当光学谐振腔受环境影响腔模参考频率发生改变, 如果这个改变量超过了一定范围, 很容易导致 PID 电路输出超过最大阈值而失锁。假设外界环境的变化为单调的斜坡函数, 通过仿真可以得到 PID 电路输出信号与系统误差信号随时间的变化情况, 如图 4 所示。

曲线 I 为误差信号, 对应左边的纵坐标; 曲线 II 为 PID 输出, 对应右边的纵坐标。在 2 s 时引入一个斜坡变化的温度信号, 温度信号上叠加了少量的振动白噪声, PID 控制信号开始发生变化, 25 s 时积分达到  $-15$  V 的输出饱和状态, 此时 PZT 再也没有了跟踪能力, 系统误差瞬间增大, 导致系统失锁。

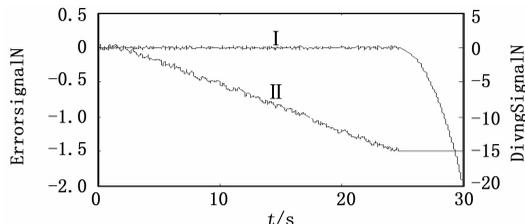


图 4 扰动下控制信号与系统误差的变化

## 3 稳频结果

实验中, 采用的商用窄线宽外腔半导体激光器温度系数为  $400$  MHz/ $^{\circ}\text{C}$ , 控制电路采用自制的基于 PI 调节的激光器自动锁定模拟电路<sup>[14]</sup>, 采用积分扫描的方式实现激光器的锁定。自动锁定模拟电路分为扫描、锁定两个部分功能, 控制激光器处于扫描模式时, 模块内置的三角波发生器为激光器提供扫描信号, 主要用于激光器锁定开始前的光路调节, 锁定时即可断开; 激光器处于锁定模式时, 即完成激光器的 PLL 稳频。仿真分析时发现, 激光器失锁一般是 PID 电路中积分电容达到饱和, 自动锁定模拟电路设置了一个积分电容阈值, 当电容电压达到该阈值时认为系统处于失锁状态, 通过该电平控制模拟开关对积分电容进行放电操作, 使控制电路重新开始积分锁定, 提高了系统的稳定性。

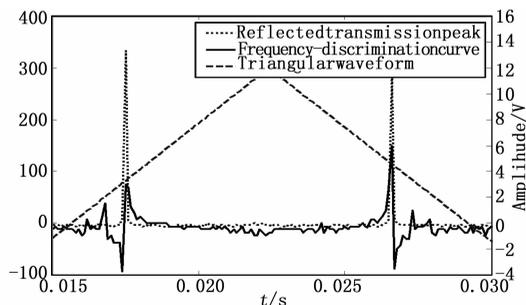


图 5 扫描腔长时反射的透射峰信号及相应的鉴频曲线

首先, 在激光器 PZT 端加载一个  $100$  Hz 的三角波信号使激光器频率在  $10$  GHz 范围内进行周期性扫描, 通过优化光路, 观察透射峰与鉴频曲线, 如图 5 所示。锁定最理想状态是把信号锁在透射信号共振峰的最高点, 鉴频曲线可通过调节直流偏置消除直流影响, 该误差信号具有较高的信噪比, 满足锁定的要求。

系统锁定后, 给三角型环形谐振腔一个随时间细微单调变化的环境温度, 图 6 显示了环境温度改变时, 锁定后 PID 控制信号与系统误差信号的变化情况, 与图 4 的仿真结

果对比,可以看出PID控制信号超过电路阈值后,系统误差发生突变,导致系统失锁。由于环境变化的不确定性,图中PID控制信号还出现了小幅抖动。

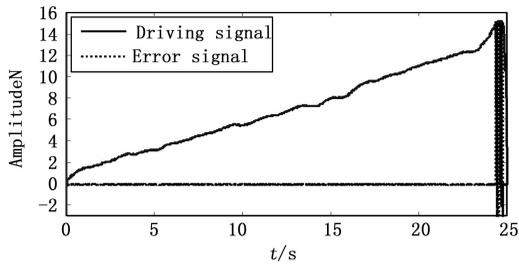


图 6 温度漂移下 PID 控制信号与系统误差信号的变化

要使激光稳频系统保持稳定运行,需要保持系统的温度环境长期稳定。实验中将系统放置在双层控温箱隔热控制,图 7 显示了脱锁到系统进入稳频状态的透射光直流监视信号,可以看出积分扫描锁定时间不超过 1 s,透射信号基本锁定在了透射峰的最高点,透射信号的交流噪声峰值在 6 mV 左右,峰值不稳定性达到 0.94%。

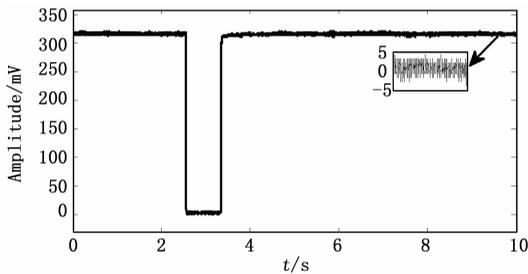


图 7 系统失锁到入锁控制过程中透射直流监视信号

当激光器稳定后,对整个系统的稳定性做了长期监测。图 8 显示了系统 1 h 内的频率稳定性,可以看出 1 h 内激光器的频率抖动小于  $\pm 5$  MHz。在精密控温的环境下,频率的长期漂移基本被抑制,目前已经实现了连续工作大于 3 天的稳频,最终失锁的主要原因还是因为频率漂移超出了 PZT 的工作范围。

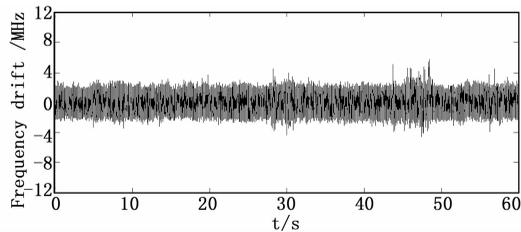


图 8 1 h 内激光器频率抖动

#### 4 结束语

基于 PDH 稳频方案,利用 PLL 理论搭建了激光稳频过程的数学模型,分析了稳频过程各个环节的传递函数,推导了激光稳频的误差传递函数。利用 Matlab/Simulink 建立了激光稳频仿真模型,分析了环境变化时激光稳频失锁机理,结果表明控制电路内部信号可作为失锁判据。进一

步利用积分扫描方式搭建了一套激光器稳频试验系统,给系统随时间单调变化的温度环境,测量到了 PID 控制信号与系统误差信号的变化情况,与仿真结果基本一致。在稳频系统精密控温的情况下,实现了激光器的长时间稳频工作,输出光频率不稳定性小于 5 MHz。本文所述的稳频方案,不仅能提高激光稳频的效果,也可对其他腔长控制领域,如激光倍频,注入锁定等提供理论依据和实验参考。下一步研究工作将根据应用需求,研究 PZT、温度双重 PID 控制下激光器的稳频问题,环路滤波与 PID 响应时间与带宽问题,进一步提高频率稳定性,为稳频窄线宽激光技术和应用提供关键技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] Yang X X, Yin Y N, Li X J et al. External cavity diode laser as a stable-frequency light source for application in laser cooling of molecules [J]. Chin. Opt. Lett., 2016, 14 (7): 071403.
- [2] Bayrakli I. Actively frequency-stabilized external cavity diode laser with a linewidth of 2.9 kHz [J]. Opt. Quant. Electron, 2016, 48: 29.
- [3] Dumont P, Camargo F, DANET J et al. Low-noise dual-frequency laser for compact Cs atomic clocks [J]. J. Lightw. Technol., 2014, 32: 3817-3823.
- [4] Han S L, Wu X, Lin Q. Frequency stabilization technologies of semiconductor laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (5): 1189-1193 (In Chinese)
- [5] Wu Y, Chen G, Shen Y et al. Long-term stabilization of the optical fiber phase control using dual PID [J]. Instrumentation, 2015, 4: 40-46.
- [6] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optics resonator [J]. Appl. Phys. B, 1983, 31 (2): 97-105.
- [7] Black E D. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization [J]. Am. J. Phys., 2000, 89 (1): 79-87.
- [8] Gardner F M. Phaselock techniques [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.
- [9] Roland E B. Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications [M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [10] Hou D, Ning B, Li P, et al. Modeling analysis for phase-locking of mode-locked laser [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2011, 47 (7): 891-898.
- [11] Tan W K, Wong H Y, Kelly A E, et al. Temperature behavior of pulse repetition frequency in passively mode-locked InGaAsP/InP laser diode experimental results and simple model [J]. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 2007, 13 (5): 1209-1214.
- [12] Kostek S, Randall C J. Modeling of a piezoelectric transducer and its application to full waveform acoustic logging [J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1994, 95 (1): 109-122.
- [13] Endo E, Tanaka Y. Estimation of phase noise in a mode-locked tunable laser [J]. Laser Phys., 2000, 10: 449-453.
- [14] Wu Y, Chen G Z, Shen Y et al. Optical frequency doubling cavity automatic locking system for second harmonic generation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (6).