



# 高稳频窄线宽半导体激光器

## High Stable Frequency Narrow Linewidth Semiconductor Lasers

**摘要:** 在相干光通信和空间光通信领域, 激光器的线宽和频率稳定性对于保证通信质量起到至关重要的影响, 因此需要采取相应的措施来压窄线宽并保证频率稳定。从芯片工艺入手, 介绍了当前几种典型芯片的结构、性能特点以及其所能达到的线宽和稳频水平。针对高稳频窄线宽的要求, 从主动稳频和被动稳频两种途径介绍稳频技术。为进一步提高稳频效果, 介绍了当前较流行的激光器驱动电路的组成, 以及温控电路的结构和相应的算法处理。

**关键词:** 高稳频; 窄线宽; 半导体激光器

**Abstract:** In the field of coherent optical communication and space optical communication, the linewidth and frequency stability of laser play an important role in ensuring the quality of communication, so it is necessary to take corresponding measures to narrow the linewidth and ensure the frequency stability. Starting from the chip technology, the structure and performance characteristics of several popular chips are proposed, in addition to the linewidth and frequency stabilization level they can achieve. According to the requirements of high frequency stability and narrow linewidth, the frequency stabilization technology is introduced from two ways: active frequency stabilization and passive frequency stabilization. In order to further improve the effect of frequency stabilization, the composition of the current popular laser driver circuit as well as the structure of the temperature control circuit and the corresponding algorithm processing are introduced.

**Keywords:** high frequency stability; narrow linewidth; semiconductor laser

陈伟 /CHEN Wei  
班德超 /BAN Dechao  
穆春元 /MU Chunyuan

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)  
(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202003014  
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.tn.20200424.1629.004.html>

网络出版日期: 2020-04-24  
收稿日期: 2020-03-10

信息技术引领社会生产新变革。为缓解目前信息传输速率和容量的压力, 以激光为载体的通信技术正在逐步取代电子通信技术, 其中, 激光器是激光通信系统中的核心元器件, 主要用于光学信号的产生和接收。半导体激光器具有小体积、长寿命、易于集成和可直接调制等优点, 已成为激光通信技术中理想的光源器件。空间激光通信和光纤相干光通信对系统的数据容量、相位噪声和灵敏度等性能指标有较高的要求, 这就要求激光器应具有较窄的线宽、低相位噪声、高频率稳定性和可调谐等特性。不同的应用场景对激光器又有不同的要

求, 例如, 空间光通信不需要激光器具有很宽的调谐带宽, 而是要求其具有窄的线宽, 一般要求洛伦兹线宽在 10 kHz 以下, 并且具有很高的频率稳定度。对于相干光通信系统, 光源不仅需要具有较窄的线宽 (一般要求线宽小于 100 kHz), 而且最好具有宽的调谐范围, 来满足现在的波分复用系统的波长要求, 同时出射光功率一般要求在 10 dBm 以上; 因此, 针对不同的应用场景, 也就需要不同的技术手段来生产和设计相应的激光器模块。

### 1 芯片和器件的制备技术

激光器模块一般包括增益芯片、光路耦合系统、驱动电路、温控电路等几部分。作为核心部分的增益芯片

的工艺比较复杂, 一般包括外延、光刻、腐蚀、溅射等工艺, 其结构层一般包括衬底层、缓冲层、隔离层、限制层、有源层、波导层、欧姆接触层以及外面的电极层等。其中有源层一般为多层量子阱结构, 以提供足够的增益。最简单的是法布里-珀罗 (F-P) 腔激光器, 其内部不存在光栅, 只通过芯片两侧的解理面来形成谐振; 所以其一般为多纵模激射, 主要用于短距离通信。在长距离通信中要求激光器为单纵模, 因此在芯片设计中引入光栅, 其中, 光栅分布在有源层中的为分布反馈 (DFB) 激光器, 光栅位于有源层两侧无源区的则是分布布拉格反射 (DBR) 激光器。DFB 激光器是在一次外延结束后, 通过光刻和刻

基金项目: 国家自然科学基金 (61675196)

蚀工艺在波导层制作所需要的光栅,之后再行二次外延,从而得到晶元片。为避免二次外延对芯片有源层的损伤,也有的工艺采用表面光栅,这种光栅是在外延片生长好之后,在脊波导刻蚀工艺中,通过干法和湿法刻蚀在脊波导上刻蚀一定的深度来形成光栅结构。由于DFB光栅分布在整个有源层区域,其一般有两个激射模。为了解决这个问题,一般在光栅制作过程中引入 $\lambda/4$ 相移,从而实现单纵模激射。DBR激光器芯片的一种制作工艺是把增益区旁边区域刻蚀到有源层以下,之后二次外延得到无源波导层,并在波导层中生长刻蚀光栅结构。DBR激光器的光栅由于是位于有源层两侧或单侧的无源波导层中,因此只有一个激射模式。激光器调谐通过电流注入和电极加热的方式改变波导层中光栅材料的有效折射率,从而改变光栅的中心波长。例如,如文献[1]的作者采用非对称相移光栅设计,通过改变DFB芯片温度(15~85℃)可以实现9.7 nm的波长调谐,同时线宽达到300 kHz。OKAI M.等<sup>[2]</sup>使用波峰调制光栅来代替传统的 $\lambda/4$ 相移,从而实现1.3 nm的调谐范围,线宽达到100 kHz,输出光强度10 mW。可以看出,单个芯片一般调谐范围在10 nm左右,这就限制了其在波分复用系统中的应用。为增加波长调谐范围,激光器阵列<sup>[3]</sup>、取样光栅<sup>[4]</sup>以及外腔光栅激光器<sup>[5]</sup>被提出和研究。其中,外腔激光器可以在实现大范围调谐的同时对线宽进行压窄,例如,文献[5]的作者实现了200 nm的调谐且线宽达到5 kHz。可以看出,光栅的使用不仅可以起到选模作用,当使用多个光栅时,还可以增大调谐范围,并且对输出线宽进行压窄。文献[6]的作者使用两个DBR光栅通过游标效应在选模的同时还实现了线宽压窄,从而使线宽达到

80 kHz,且调谐范围覆盖C波段。由此可见,芯片的设计会从根本上影响其应用性能和应用场景,但是单个芯片必须辅以精准的驱动电路和温控电路才能更好地保证模式、线宽的稳定,同时对于一些稳定性和线宽要求较高的地方还需要稳频技术的辅助才能满足通信要求。

## 2 稳频技术

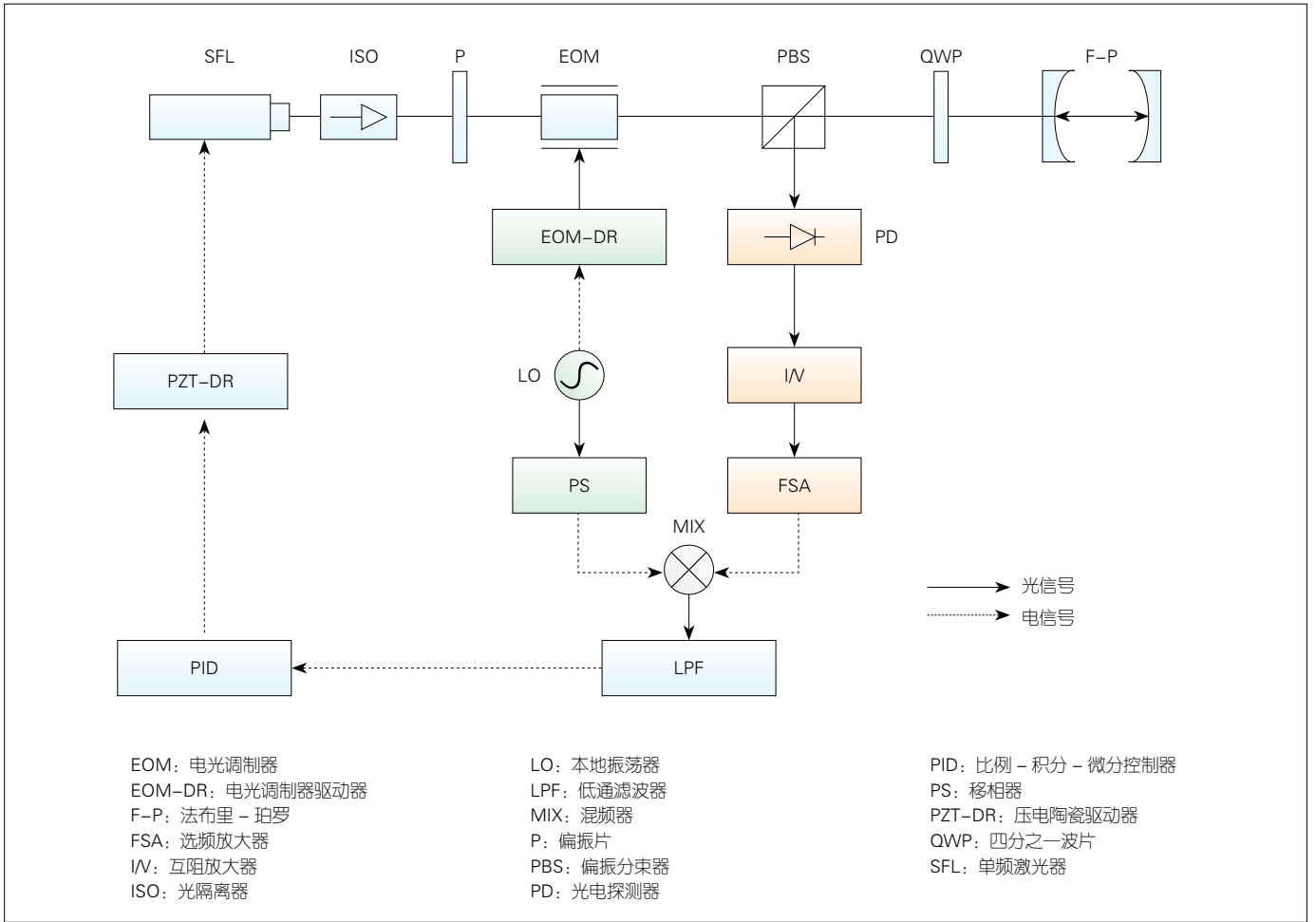
激光器芯片虽然可以通过结构和外延层设计优化来改善其线宽、功率、调谐、边模抑制比等性能,但是由于芯片工作时的温度、电流变化,其频率会出现大的波动甚至会有跳模的发生。这时候就需要检测芯片的输出频率,并对芯片的驱动电流进行调整来实现激光器稳定工作。首先,要获取频率信息一般需要鉴频器,其种类有气体吸收池和F-P标准具。气体吸收池的原理是其内部气体会吸收特定波长的光,之后会由于饱和吸收效应透射谱上会出现透射峰,通过调整驱动电流使得激光器频率稳定在这一透射峰附近。在光通信领域常用的气体吸收池是氦气(1 291 nm)和乙炔(1 510~1540 nm)。F-P标准具的透射谱由一系列的透射峰组成,一般选择其中一条作为参考。由于温度会改变标准具的腔长,所以一般选用低热膨胀系数的材料制作标准具,并辅以相应的温控系统。通过鉴频器获取频率信息之后,还需要提取信息并分析,然后调整驱动电流或者其他一些如外腔腔长、光栅倾角等参数。Pound-Drever-Hall(PDH)算法<sup>[7]</sup>就是一种通过F-P标准具获取频率信息来实现稳频的技术,其系统如图1所示<sup>[8]</sup>。这种技术的原理是单频激光通过电光调制器(EOM)之后会在载频两侧产生幅度相等相位相反的两个边带,将调制光与载波拍频,如果激光等于F-P

标准具的共振频率,则拍频后两个边带会互相抵消,输出电流为零,若是与F-P标准具的共振频率存在一定差距,则会输出一个电信号。这个电信号经过滤波、放大后即可作为稳频的误差信号,并由此调节激光器的频率。文献[9]中作者采用PHD算法把线宽压窄到1.5 Hz,同时频率稳定度小于 $2 \times 10^{-15}$ 。

上面提到的稳频技术都是通过获取芯片频率信息、主动改变激光器的工作状态来保证激光器的频率稳定,属于主动稳频技术。相应的还有被动稳频,其鉴频器也是F-P标准具,根据F-P腔对不同波长的光具有不同的反射系数这一性质,就可以把激光器的频率噪声转化成强度噪声<sup>[10]</sup>。这种被动稳频的原理也称为光负反馈作用,首先确定需要稳定的频率点,当出射光频率大于这个频率点时,反馈光强度会变大,从而抑制腔内的载流子浓度,根据等离子效应有效折射率会升高,从而导致出射光频率降低,反之则频率升高。通过上述途径就可以使激光器的频率稳定在需要的频率点,并且压窄线宽,例如,文献[10]得到线宽3 kHz的单频输出。

## 3 低噪声恒流驱动技术

上文虽然提到通过获得激光器的频率信息,然后调整芯片的驱动电流来实现激光器频率的稳定,但那是其驱动电流中不含有噪声的情况。如果驱动电流存在扰动,则会引起芯片电流密度产生数量级的变化,将严重影响激光器的输出模式、功率、相位噪声、线宽等,如在1 550 nm附近1 mA的驱动电流变化可以引起输出光频率变化约360 MHz<sup>[11]</sup>;因此,在激光器的恒流驱动设计中,要充分考虑激光器的电学参数,在合理的范围内做好限流、防浪涌和过冲等安全保护措施。



▲图1 Pound-Drever-Hall (PHD) 系统图<sup>[8]</sup>

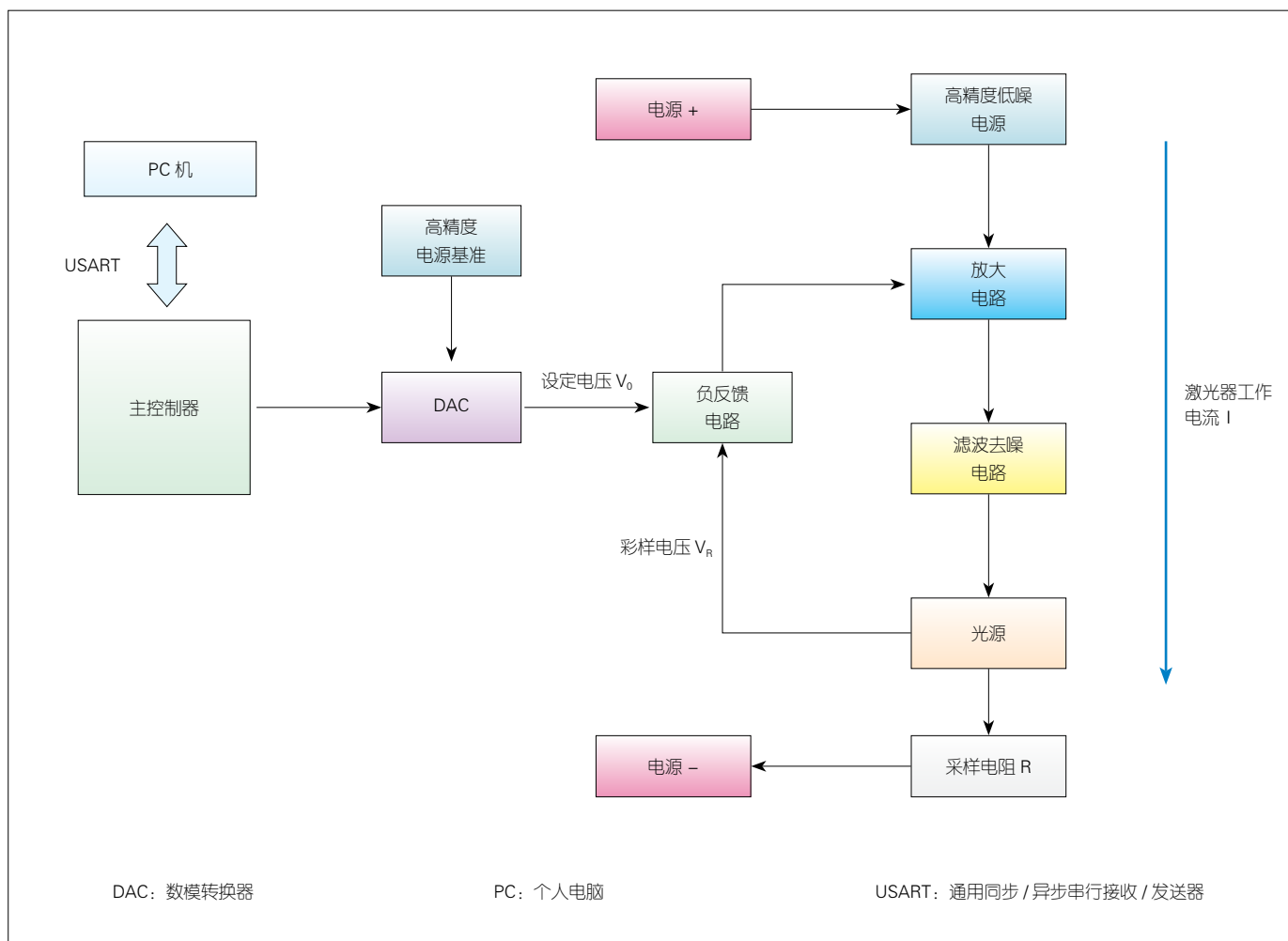
例如，文献 [12] 中作者提出的双通道驱动电路，其波纹系数小于 0.075%。华南理工大学<sup>[13]</sup>设计的电流负反馈驱动电路，可以实现 0.5% 的高稳定度电流输出，并设计相应的延时启动电路以防止电流浪涌的影响。作为驱动电路中常用的电流负反馈系统，如图 2 所示，其主要的功能模块包括：（1）总控功能模块，由微控单元（MCU）、数模转换器（DAC）、高精度电源基准构成，主要负责反馈电路的数据采集、校准、延时控制设定以及对外通信（如外接 PC 机）等工作；（2）电流采集和负反馈控制模块，由采样电阻、负反馈电路和放大电路三者组成，它们协同工作完成负反馈恒流控制；

（3）滤波去噪模块，主要由滤波去噪电路和容感器件组成，其作用是对电流驱动系统的电、热噪声进行处理，以消除噪声对激光器的影响。只有保证激光器驱动电流的稳定，才能避免电流噪声的影响，减少由电流噪声引起的波长偏移和抖动。

#### 4 高精度温度智能控制

半导体激光器是一种的电-光转换器件，它的一般的工作原理是：在电流驱动下，半导体工作物质的导带与价带之间或半导体物质的受主与施主之间，实现非平衡载流子的粒子数反转，处于粒子数反转态的大量电子与空穴复合，产生受激辐射，在谐

振腔的作用下形成受激振荡输出激光；但是，由于存在非辐射复合损耗、自由载流子吸收等损耗机制，激光器芯片的外微分子效率只能达到 20% ~ 30%，同时大部分的注入电流转化为热量，导致激光器的温度升高，阈值电流增大，激光器输出光功率降低，波长偏移以及模式跳模。以用半导体外腔激光器的空间光通信为例，温度每变化 1℃，激光器的波长变化约为 10 pm，温度的不稳定将严重影响相干调制以及空间通信系统的使用。另一方面，在一些如太空、海底以及沙漠等恶劣环境下，温度变化较为剧烈，使得激光器件的温度更加难以控制；因此，为了保证激光器在不同温



▲图2 恒流控制结构框图

度环境下都能正常工作，必须对激光器实现高精度温度控制。

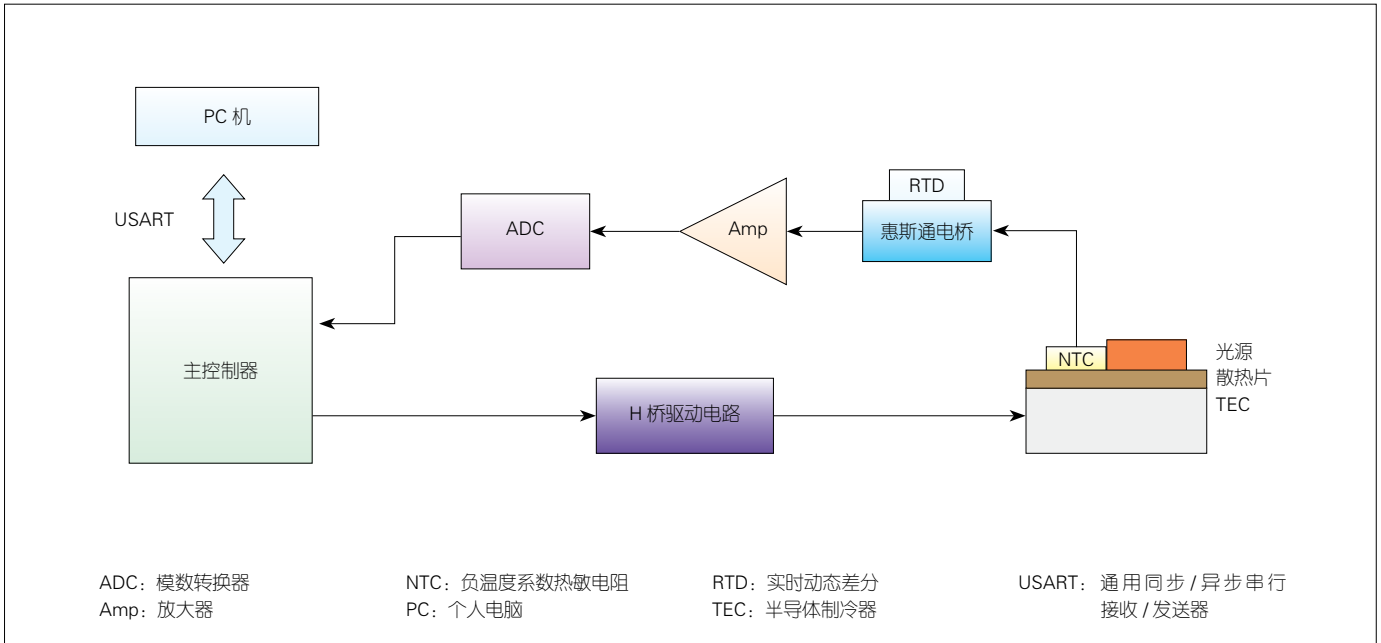
当前存在大量的激光器温度控制方法，比如，通过使用控温芯片 MAX1968，文献 [14] 和 [15] 的作者分别实现  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。现在使用最为广泛的则是传统的模拟比例-积-微分 (PID) 控制方式，如文献 [16] 的作者使用热敏电阻结合模拟 PID 电路的方案实现  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。模拟 PID 电路的优点是其简单的电路比较好实现，缺点是整定、修改参量繁琐，而且与其他仪器传输数据较为困难；所以，现在的研究多用数字电路来解决

温度控制。如文献 [17] 的作者基于粒子群自整定 PID 算法实现  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度控制精度。数字 PID 控制电路的具体温控系统框图如图 3 所示，该系统主要由主控单元 (MCU)、高精度模数转换器 (ADC)、负温度系数热敏电阻 (NTC)、实时动态差分 (RTD) 电路、预放大电路以及半导体制冷器 (TEC) 控制电路组成。其中，PC 机与主控单元可以进行通信，实现程序下载和维护；ADC 会采集由预放大电路放大的电压模拟信号，之后把信号传送给 MCU；MCU 通过对内部编写的 PID 算法进行分析后，改变 TEC 的电压从而对芯片进行加热

或者制冷。采用这种技术的外腔激光器，可以使温度漂移低于  $0.0010\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，线宽达到  $4.5\sim 7.5\text{ kHz}$ <sup>[18]</sup>。

## 5 结束语

从上文的讨论中可以看出，要想实现激光器的窄线宽高稳频输出，可以从芯片工艺出发，改进芯片结构来实现激光器性能的优化。不同的应用场景可以选择 DFB、DBR、取样光栅 (SG)-DBR 或者其他集成多个光栅和放大器的芯片。为进一步提高激光器的稳定性和单频特性，压窄线宽可以结合外腔光反馈和电反馈等稳频技术来改善激光器的输出特性。应



▲图 3 温控系统结构框图

用低噪声的电流驱动电路和精准的温度控制电路保证了稳频系统和芯片工作环境的稳定，使其免受电流噪声和热噪声的影响。

参考文献

[1] FAUGERON M, TRAN M, PARILLAUD O, et al. High-power tunable dilute mode DFB laser with low RIN and narrow linewidth[J]. IEEE photonics technology letters, 2013, 25(1): 7-10. DOI: 10.1109/pt.2012.2225419

[2] OKAI M, TSUCHIYA T. Tunable DFB lasers with ultra-narrow spectral linewidth[J]. Electronics letters, 1993, 29(4): 349. DOI: 10.1049/el:19930236

[3] HATAKEYAMA H, NANIWAE K. Wavelength-selectable microarray light sources for s-, c- and l-bands WDM applications[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Anaheim, CA, USA. Opt Soc. America. DOI: 10.1109/ofc.2002.1036308

[4] MASON B, FISH G A, DENBAARS S P, et al. Widely tunable sampled grating DBR laser with integrated electroabsorption modulator[J]. IEEE photonics technology letters, 1999, 11(6): 638-640. DOI: 10.1109/68.766769

[5] BENNETTS S, MCDONALD G D, HARDMAN K S, et al. External cavity diode lasers with 5 kHz linewidth and 200 nm tuning range at 155 um and methods for linewidth measurement[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10642. DOI: 10.1364/oe.22.010642

[6] Matsui Y, Eriksson U, Wesstrom J O, et al. Narrow linewidth tunable semiconductor laser[C]//Compound Semiconductor Week. USA: IEEE, 2016

[7] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-

Hall laser frequency stabilization[J]. American journal of physics, 2001, 69(1):79-87. DOI: 10.1119/1.1286663

[8] 齐艺超. 窄线宽激光器稳频技术研究[D]. 中国科学院半导体研究所, 中国科学院大学, 2019

[9] STOEHR H, MENSING F, HELMCKE J, et al. Diode laser with 1 Hz linewidth[J]. Optics letters, 2006, 31(6): 736-738. DOI: 10.1364/ol.31.000736

[10] AOYAMA K, YOKOTA N, YASAKA H. 3 kHz spectral linewidth laser assembly with coherent optical negative feedback[J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(3): 277-280. DOI: 10.1109/pt.2017.2783365

[11] VODHANEL R S, ELREFAIE A F. Performance of direct frequency modulation DFB lasers in multigigabit per second ASK, FSK, and DPSK lightwave systems[C]//Optical Fiber Communication, San Francisco, California. Washington, D.C.: OSA, 1990. DOI: 10.1364/ofc.1990.tu16

[12] 胡晓青, 车延博, 薛慧云. 高精度双通道激光器恒流驱动电源设计[J]. 激光杂志, 2015, 36(7): 8-12. DOI: 10.14016/j.cnki.jgzz.2015.07.008

[13] 程前, 邓华秋. 半导体激光器驱动电路及温控系统设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 1185-1189

[14] 罗亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 200-204

[15] 吴栋. 可调谐窄线宽半导体激光器驱动设计[D]. 深圳: 深圳大学, 2017

[16] 吴俊, 李长俊. 基于 TEC 的高精度温控系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(20): 75-79. DOI: 10.14022/j.cnki.dzsjgc.2017.20.019

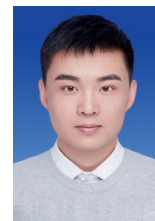
[17] 齐艺超, 陈伟, 穆春元, 等. 基于粒子群自整定 PID 算法的激光器温度控制系统[J]. 激光技术, 2019, 43(5): 60-64. DOI: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.05.012

[18] 谭俊, 穆春元, 王跃辉, 等. 同波段异频点高稳定四路集成激光器模块[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 36-44

作者简介



**陈伟**, 中国科学院半导体研究所副研究员; 主要研究方向为光电子器件及模块, 长期从事光电子器件及模块的研究工作; 主持设计研制的窄线宽可调谐激光器正样产品, 已在 5 颗北斗卫星的星间激光通信系统中获得应用; 获授权发明专利 40 余项, 荣获 2016 年中国通信学会科学技术一等奖、2018 年军队科技进步一等奖、2018 年国家技术发明二等奖。



**班德超**, 中国科学院大学在读博士研究生; 从事可调谐窄线宽和光通信系统研究工作; 发表 SCI 论文 2 篇。



**穆春元**, 中国科学院半导体研究所工程师; 主要从事窄线宽激光器及光电模块研发工作。