

# 基于半导体光放大器的可调谐环形腔激光器的 激光建立过程

刘英峰 王 智 张丽梅 陈颖川 吴重庆

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 基于半导体光放大器(SOA)的环形腔激光器可实现高达兆赫兹的高速调谐,在光纤通信和光纤传感领域有广泛应用。采用稳态模型和分段算法研究 SOA 自发辐射特性,并基于此分别讨论了使用高斯型滤波器和法布里-珀罗(F-P)滤波器的两种可调谐环形腔激光器,研究了激光建立过程的特性,包括输出光谱和输出光功率随绕行圈数的变化,讨论了波长调谐的速度。结果表明,F-P 滤波器的环形腔可以更快建立激光振荡,便于实际高速调谐应用。

**关键词** 激光器;半导体光放大器;可调谐环形腔激光器;放大的自发辐射;F-P 滤波器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202002

## Lasing of the Tunable Fiber Ring Laser Based on Semiconductor Optical Amplifier

Liu Yingfeng Wang Zhi Zhang Limei Chen Yinchuan Wu Chongqing

(Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology,

Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** The fiber ring laser based on the semiconductor optical amplifier (SOA) is widely used for optical communications and optical fiber sensing, because it can be tuned at an ultra high speed up to Mega hertz. The steady-state model and segmentation algorithm are employed to study the amplified spontaneous emission (ASE) properties of the SOA, then two kinds of the tunable ring lasers based on SOA (SOA-TRL) are investigated with the Gaussian or Fabry-Perot (F-P) filter. The evolutions of the output spectra and the peak power are demonstrated with the round trip of the light traveling in the ring cavity, which show the lasing process from the ASE to laser. It shows that the F-P filter can improve the wavelength tuning speed because the SOA-TRL with an F-P filter can establish the laser within only a few round trips, and it could be designed for some high speed applications.

**Key words** lasers; semiconductor optical amplifier; tunable ring laser; amplified spontaneous emission; F-P filter

**OCIS codes** 140.3460; 170.4500; 230.6080

## 1 引 言

基于半导体光放大器的可调谐环形腔激光器(SOA-TRL)的基本结构由光纤连接 SOA 和可调谐滤波器、耦合器、隔离器等构成环形结构,它具有调谐速度快、输出光谱线宽窄、调谐范围宽等许多独特的优点,因而广泛应用于光纤通信、光纤传感和全光信

号处理中。基于该结构可实现连续激光器<sup>[1]</sup>,主动锁模激光器<sup>[2]</sup>,高质量、高重复率的被动锁模激光器<sup>[3]</sup>;还可以通过快速调谐方式实现波长扫描连续输出激光器和频域锁模激光器(FDML)<sup>[4]</sup>,用于高分辨率光学层析成像(OCT)<sup>[5]</sup>和分布式光纤传感<sup>[6]</sup>;利用 SOA-TRL 的四波混频效应实现波长变

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61077048,61077014),基本科研业务费(2009JBM103,2012JBM103)资助课题。

作者简介: 刘英峰(1988—),女,硕士研究生,主要从事可调谐环形激光器等方面的研究。

E-mail: 11121825@bjtu.edu.cn

导师简介: 王 智(1971—),男,博士,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

换器<sup>[7]</sup>,利用光控载流子抑制技术可实现光触发器,用于全光时钟恢复等全光网络节点信号处理<sup>[8]</sup>。尽管基于这种 SOA-TRL 结构的激光器的应用研究比较多,但是有关基本机理和激光器的基础研究却很少。激光器输出光功率和输出光谱等都只有一些定性的解释和说明,缺乏准确的理论研究和数值分析。

SOA-TRL 的环长通常数十米,光在其中绕行一周的时间数百纳秒,比一般的体结构 SOA 的增益恢复时间(主要由载流子恢复时间决定,约百皮秒量级)长得多,而且实验表明,通常由放大的自发辐射(ASE)经 SOA 数十圈后可形成稳定激光输出,此时系统工作于稳定激光输出状态,整个建立过程大约耗时数微秒。因此,在激光建立过程中,可以认为 SOA 处于稳态工作状态。

本文采用稳态模型和分段算法研究 SOA 自发辐射过程,然后分别研究高斯型滤波器和法布里-珀罗(F-P)滤波器两种结构的激光建立过程和输出特性。

## 2 理论模型与算法

SOA-TRL 基本结构如图 1 所示,在正向电流偏置下,ASE 和外界入射光的传播造成 SOA 内部载流子的受激辐射复合消耗。由于光场在 SOA 中的传播满足指数放大规律,因此载流子沿 SOA 纵向呈非均匀变化。本文采用分段模型研究不同位置的载流子和光子数密度分布,认为每个小段内载流子密度均匀,理论上分段数目越大结果越精确,在实际数值模拟中,当分段数目达到 40 时算法收敛性很好,因此为了达到一定的精度,并节省程序运行时间,本文计算时分段数目取 40。另一方面,不同波长(频率)的光在 SOA 中的增益不同,消耗的载流

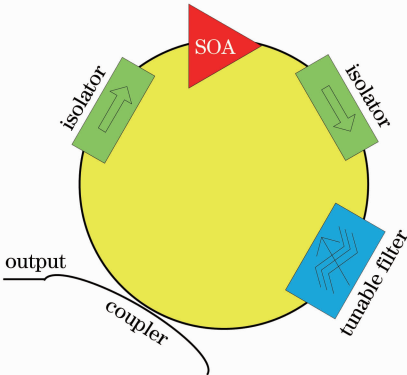


图 1 SOA-TRL 基本结构

Fig. 1 Basic scheme of the SOA-TRL

子也不相同,而且 SOA 中的 ASE 噪声光谱宽度达到 100 nm 左右,不同频率处的强度不同,在 SOA 中传播时的增益也不同。因此对自发辐射谱进行频率分割,把一定频率宽度范围内的自发辐射噪声看成单频光,通过将连续的频率谱离散化来研究整个 ASE 光谱的特性。

载流子密度  $N$  在纵向位置  $z$  处满足如下速率方程<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dN(z)}{dt} = \frac{I}{edLW} - R[N(z)] - \frac{\Gamma}{dW} \left\{ \sum_{k=1}^{N_s} g_m[\nu_k, N(z)] [N_{sk}^+(z) + N_{sk}^-(z)] \right\} - \frac{2\Gamma}{dW} \left\{ \sum_{j=1}^{N_m-1} g_m[\nu_j, N(z)] K_j [N_j^+(z) + N_j^-(z)] \right\}, \quad (1)$$

式中  $I$  为注入电流,  $e$  为基本电荷电量,  $L, d, W$  分别为有源区的长、高、宽,  $\Gamma$  为有源区光场限制因子,  $g_m$  为有源区材料增益系数,等号右边第一项为载流子注入过程,第二项为自发辐射复合过程,第三项为外界注入光(抽运光、信号光等,频率为  $\nu_k$ ) 导致的受激辐射复合过程,其中  $N_{sk}^+(z), N_{sk}^-(z)$  分别为沿正向、反向传播的外界注入光在  $z$  处的光子速率,等号右边第三项表示 ASE 导致的受激辐射复合过程,其中  $N_j(z)^+, N_j(z)^-$  分别为正、反向传播的自发辐射(频率为  $\nu_j$ ) 在  $z$  处的光子速率。

参考 Connelly<sup>[9]</sup> 提出的算法并结合环形腔激光器的结构分析 SOA 的 ASE 光谱和放大过程,具体实现的算法过程不再赘述,算法流程图如图 2 所示。

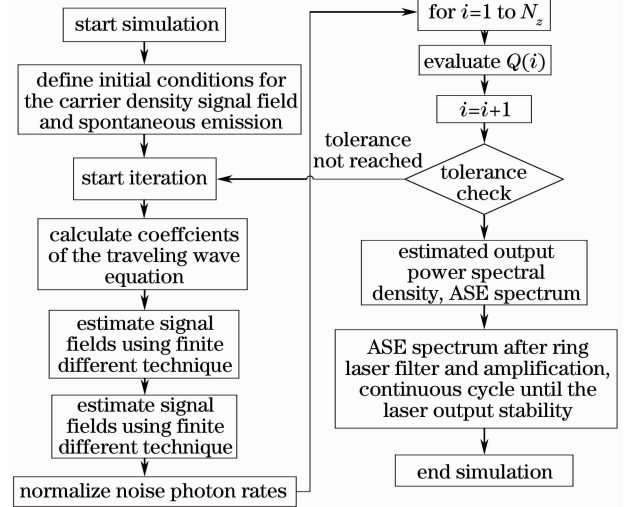


图 2 SOA-TRL 仿真流程

Fig. 2 Simulation flow chart of the SOA-TRL

### 3 SOA 的 ASE 特性

可调谐环形腔激光器的输出都是从 ASE 开始经过多次放大后形成的,因此,SOA 的 ASE 光谱和增益特性是激光器特性的根本决定因素。本文首先研究 SOA 的 ASE 特性,仿真研究中,假设外界注入波长为 1550 nm 的连续光。

图 3 是 SOA 的 ASE 光谱,其中图 3(a)对应的

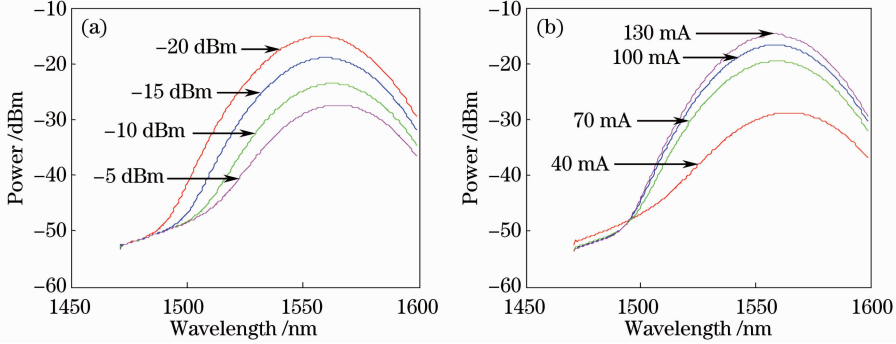


图 3 不同工作状态时 SOA 的 ASE 光谱。(a)不同注入光功率;(b)不同注入电流

Fig. 3 ASE spectra of the SOA at (a) different input powers and (b) different inject currents

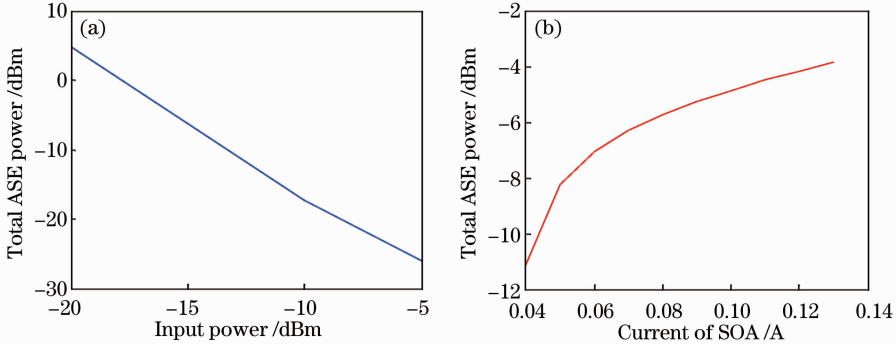


图 4 SOA 的 ASE 总功率。(a)注入电流为 100 mA;(b)注入光功率为 -10 dBm

Fig. 4 Total ASE power of the SOA. (a) Inject current is 100 mA; (b) input power is -10 dBm

可以看出,在特定波长上,随着注入光功率增大,SOA 的 ASE 功率谱越低,而且 ASE 谱变窄,主要原因是注入光抑制了 SOA 的自发辐射过程。随着注入电流增大,ASE 功率谱升高,注入电流较小的情况下增加得更快,而且峰值波长蓝移。因此,可以调节外部注入光功率和波长位置,或者调节注入电流大小,实现对 SOA 的 ASE 谱的调节,从而控制 SOA 的增益特性和噪声特性。

### 4 可调谐环形腔激光器的激光建立过程

在 SOA 的 ASE 研究基础上,利用可调谐滤波器和耦合器构成环形腔,引入反馈和滤波,即可形成 SOA-TRL。

SOA 注入电流为 100 mA,注入光功率分别为 -20、-15、-10、-5 dBm,图 3(b)对应的注入光功率为 -10 dBm,SOA 注入电流分别为 40、70、100、130 mA。图 4(a)是注入电流为 100 mA 时的 ASE 总功率随注入光功率的变化,图 4(b)是注入光功率为 -10 dBm 时的 ASE 总功率随注入电流的变化。

#### 4.1 输出光谱的演化

高斯型和 F-P 型滤波器的归一化透过特性可表示为

$$T_{\text{Gauss}}(\omega) = \exp\left[-\ln 2 \times \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Omega_0}\right)^2\right] = 2^{-[(\omega - \omega_0)/\Omega_0]^2}, \quad (2)$$

$$T_{\text{FP}}(\omega) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sin\left(\frac{m\pi\omega}{\omega_0}\right)}{\sin\left(\frac{m\pi\Omega_0}{\omega_0}\right)}\right]^2},$$

式中  $\omega_0$  是与滤波器中心波长对应的中心频率, $\Omega_0$  为半峰全宽, $m$  为谐波阶数,根据实际 F-P 滤波器参数选取  $m=20$ 。如果 SOA 的注入电流为 200 mA,环形腔长为 20 m,光纤损耗为 0.2 dB/km,耦合器分光比为 7:3(反馈 70%,输出 30%),滤波器中心波长为 1550 nm,3 dB 带宽为 0.26 nm。SOA 的 ASE 经过滤波器后在环内每绕行一圈都得到放大,谱线

宽度变窄,如此不断滤波反馈,滤波器通带内的光不断得到放大,最终趋于 SOA 的饱和输出功率,形成稳定激光,输出波长由滤波器决定。

图 5 是 SOA-TRL 激光建立过程中,从 ASE 开始,光在环形腔中绕行、放大、滤波、衰减后的逐圈输出演化情况。图 5 只给出了部分绕行输出光谱,分别为 1、5、10、15、50、100、500 圈。图 5(a)和 (b)分别是高斯型滤波器和 F-P 型滤波器的光谱演化结果。从图中可以看出,绕行圈数较少时,随着绕行圈

数增加,光谱变化比较多,峰值功率增加,线宽变窄,100 圈以后,光谱基本没有变化,峰值功率约为 9.28 dBm,3 dB 线宽约为 0.054 nm,也就是说绕行超过一定圈数之后,输出稳定激光。由于高斯型滤波器和 F-P 滤波器的传输特性不同,在绕行圈数较少时,两种结构的输出光谱有明显差异,而且显然 F-P 型滤波器的输出光谱线宽变窄的过程更快。绕行超过一定圈数之后,都形成稳定激光输出,两种结构的输出光谱几乎完全相同。

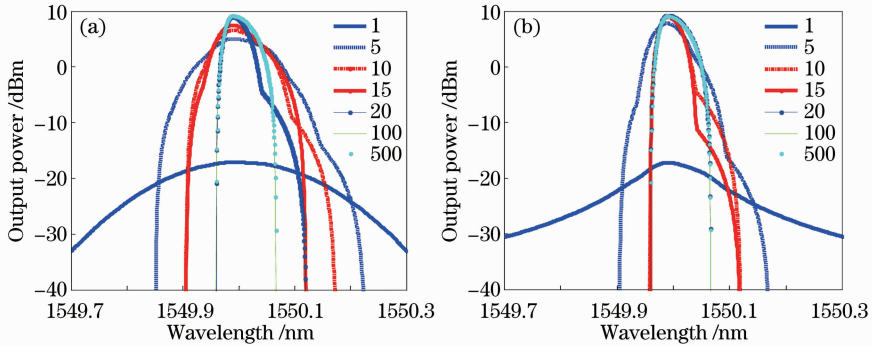


图 5 (a)高斯型和(b) F-P 型滤波器的 SOA-TRL 的光谱演化

Fig. 5 Spectra evolution of the SOA-TRL with (a) Gaussian filter and (b) F-P filter

#### 4.2 输出功率的演化

图 6 为环形腔激光器输出峰值波长处光功率随绕行圈数的演化过程,为了便于观察两种不同滤波器的区别,图 6(a)仅显示绕行 100 圈之前的结果,而且输出功率对 SOA 的饱和输出功率归一化。显然随着绕行圈数增加,输出功率越来越大,趋近于 SOA 的饱和输出功率。图 6(b)为绕行圈数增加到 500 圈时的峰值功率变化,同时给出了没有滤波器的环形腔的情况。需要指出的是,没有滤波器时,输出激光的峰值波长由 ASE 谱和环形腔决定,大约位

于 1572.9 nm 处。

从图 6 可以看出,没有滤波器时,激光建立过程很慢,绕行圈数很多,消耗时间较长,图中显示绕行 500 圈时,仍然没有形成稳定输出。使用 F-P 型滤波器比高斯型滤波器的激光建立过程要快,例如,输出达到饱和功率的 95%,F-P 和高斯型分别需要绕行 10 圈和 48 圈,建立过程消耗的时间分别约为 1  $\mu$ s 和 4.8  $\mu$ s;若输出 80%的饱和功率,分别仅需 6 圈和 24 圈,耗时约为 0.6  $\mu$ s 和 2.4  $\mu$ s。

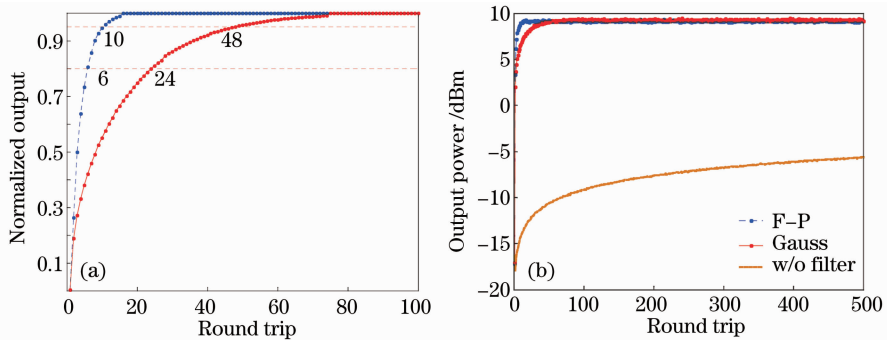


图 6 不同滤波器构成的 SOA-TRL 输出峰值光功率的演化

Fig. 6 Evolution of the output peak power of the SOA-TRL with different filters

#### 4.3 调谐速度

从上面比较高斯型滤波器和 F-P 型滤波器的激光建立过程,容易看出 F-P 型滤波器更有利于快

速建立激光输出,也就是基于 F-P 滤波器的环形腔激光器可实现更高的调谐速度,其根本原因是在 3 dB 带宽范围内,F-P 型滤波器的选择性比高斯型

滤波器的选择性更强。

如果 F-P 滤波器的 3 dB 带宽为 0.1 nm, 自由光谱区(FSR)为 80 nm, 且全部在 SOA 的 ASE 光谱范围内, 那么可调谐范围也能达到 80 nm, 精细度为 800, 按绕行 10 圈形成激光计算, 在相邻两个精细谱线(间隔为 0.1 nm)之间调谐的最快时间可达到 1  $\mu$ s, 整个调谐范围内的调谐时间为 800  $\mu$ s, 即全范围调谐频率最高可达到 1.25 kHz。

当调谐频率高于 1.25 kHz 时, 绕行圈数少于 10 圈, ASE 被放大, 滤波的次数不够, 不能形成接近饱和功率的激光输出。但是, 当调谐频率达到绕行频率[等于腔内光速/腔长, 如本文中约为 10 MHz =  $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) / (1.5 \times 20 \text{ m})$ ]时, 依次经过滤波器的不同波长的光将在绕行一圈之后, 再次通过滤波器, 反馈进入 SOA 放大, 经过数圈绕行之后, 也能形成稳定激光输出(这里忽略环形腔内光纤的群速度色散)。这种极高调谐频率的激光建立过程并不是每次调到新的波长时都从 ASE 开始, 而是从上一圈被 SOA 放大的光继续下一圈的反馈绕行过程。实际上, 当滤波器调谐频率是绕行频率的整数倍时, 都可以形成高速调谐激光输出, 这也是目前越来越引起人们重视的频域锁模激光器<sup>[4~6, 10, 11]</sup>。环形腔的光纤越短越能获得高速波长扫描的激光输出, 但是, 由于扫描速度受滤波器的调谐速度限制, 而目前滤波器的调谐机构一般是压电换能器(PZT)驱动, 其调谐频率受限于 PZT 的固有频率, 很难超过数十万赫兹, 因此, 为了提高频域锁模激光器的实用性, 通常利用数十千米的光纤构成环形腔, 使腔内绕行频率降到数万赫兹或数十万赫兹<sup>[4~6, 10, 11]</sup>, 从而便于实际 F-P 滤波器的正常工作。

## 5 结 论

基于 SOA 的稳态模型和分段算法对可调谐环形腔激光器进行了理论研究, 首先计算了外部注入光功率和 SOA 驱动电流变化时 SOA 的自发辐射谱; 然后建立了可调谐环形腔激光器的模型, 分别研究两种滤波器的环形腔激光器的激光建立过程, 包括输出光谱和输出峰值功率随绕行圈数的演化。通

过数值计算得到, F-P 和高斯型滤波器分别构成的 SOA-TRL(环长为 20 m)输出达到饱和功率的 95% 时, 建立过程耗时分别约为 1  $\mu$ s 和 4.8  $\mu$ s, 输出达到饱和功率的 80% 时, 耗时分别约为 0.6  $\mu$ s 和 2.4  $\mu$ s, 基于 F-P 滤波器的环形腔激光器可实现更高的调谐速度。

## 参 考 文 献

- 1 L. Xu, B. C. Wang, V. Baby *et al.*. Optical spectral bistability in a semiconductor fiber ring laser through gain saturation in an SOA[J]. *Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(2): 149~151
- 2 J. He, K. T. Chan. All optical actively mode-locked fiber ring laser based on cross-gain modulation in SOA[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(24): 1504~1505
- 3 K. Ziros, K. Vlachos, T. Stathopoulos *et al.*. 40 GHz mode-locked SOA fiber ring laser with 20 nm tuning range[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, **1**(7-10): 254~256
- 4 R. Huber, M. Wojtkowski, J. G. Fujimoto. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3225~3237
- 5 S. W. Huang, A. D. Aguirre, R. A. Huber *et al.*. Swept source optical coherence microscopy using Fourier domain mode-locking laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6210~6217
- 6 Chen Daru. Advanced Optical Fiber Laser Technology and Its Use in the Application of Optical Sensor and Optical Microwave [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009  
陈达如. 先进光纤激光器技术及其在光传感、光学微波产生的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2009
- 7 Chi Nan, Qi Jiang, Zheng Yuan *et al.*. Ultra-broad, fully-transparent and tunable wavelength conversion based on FWM with two orthogonal pump in a semiconductor fiber ring laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(7): 654~658  
迟楠, 齐江, 郑远等. 超宽带可调谐 SOA 四波混频波长变换器的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(7): 654~658
- 8 K. Vlachos, G. Theophilopoulos, A. Hatziefremdis *et al.*. 30 Gb/s all-optical clock recovery circuit [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 705~707
- 9 M. J. Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(3): 439~447
- 10 Chen Minghui, Ding Zhihua, Wu Tong *et al.*. Fourier domain mode locking swept laser source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0614002  
陈明惠, 丁志华, 吴彤等. 傅里叶域锁模扫频激光光源[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0614002
- 11 Ding Zhihua, Chen Minghui, Wang Kai *et al.*. Highspeed swept source and its applications in optical frequency domain imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2469~2476  
丁志华, 陈明惠, 王凯等. 快速扫频光源及其在光学频域成像中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2469~2476