

# 激光与光电子学进展

## 基于光学滤波器的扫频光纤激光器研究进展

游关红<sup>1</sup>, 彭万敬<sup>2</sup>, 邹辉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621054

**摘要** 扫频光纤激光器在光纤传感、生物医学以及光谱学等领域有着极其重要的应用价值,扫频光纤激光器的中心波长、扫频速度、扫频范围、输出功率等参数决定了光纤传感系统和生物成像系统的性能,因此,对扫频光纤激光器及其各项性能参数的研究具有重要意义。目前研究的扫频光纤激光器主要可以分为两大类:一类是基于色散调制扫频光纤激光器,另一类是基于光学滤波器的扫频光纤激光器。主要介绍了基于光学滤波器的扫频光纤激光器的研究进展和在各项性能参数上的研究成果。同时,指出其存在的问题并对扫频光纤激光器的发展进行展望。

**关键词** 激光器; 扫频光纤激光器; 光学滤波器; 扫频速度; 扫频带宽; 光功率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0100006

## Research Progress of Frequency-Swept Fiber Lasers Based on Optical Filter

You Guanhong<sup>1</sup>, Peng Wanjing<sup>2</sup>, Zou Hui<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

<sup>2</sup>Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621054, China

**Abstract** Frequency-swept fiber lasers have extremely important application values in the fields of fiber sensing, biomedical, and spectroscopy. The parameters such as the center wavelength, sweep speed, sweep range, and output power of the frequency-swept fiber laser determine the performance of the fiber sensing system and the biological imaging system. Therefore, it is of great significance to study the frequency-swept fiber laser and its various performance parameters. The frequency-swept fiber lasers currently studied can be divided into two major categories, one is based on dispersion-modulated frequency-swept fiber lasers, and the other one is based on optical filters. This article mainly introduces the research progress of the frequency-swept fiber laser based on the optical filter and the research results on various performance parameters. At the same time, it points out its existing problems and prospects the development of frequency-swept fiber lasers.

**Key words** lasers; frequency-swept fiber laser; optical filter; sweep rate; sweep range; optical power

**OCIS codes** 140.3510; 230.7408; 300.3700

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(61405096)

\*E-mail: zouhui1010@163.com

## 1 引言

20 世纪 80 年代中期,光纤激光器开始进入实用化阶段,随后在光通信、光传感、激光加工和医疗等领域得到了飞速发展<sup>[1]</sup>。而扫频光纤激光器作为光纤激光器的一种,主要特点是输出波长随着时间不断变化<sup>[2]</sup>。扫频光纤激光器在光纤传感、生物医学以及光谱学等领域有着极其重要的应用价值<sup>[3]</sup>,从提出至今,一直受到国内外研究者的广泛关注。

扫频光纤激光器的性能参数主要包括中心波长、扫频速度、扫频范围、瞬时线宽和输出功率等,不同的性能参数可以应用在不同领域。在光纤传感系统中,为了获得传感信号,必须对光谱信息进行解调,从而分析出光谱各波长携带的物理信息<sup>[4-5]</sup>。利用扫频光纤激光器波长随时间变化的特点,输出激光在扫频机制的作用下,以特定的扫描步长在光谱上进行信息采集。信息采集的精度决定于扫频光纤激光器的扫频范围,而解调的速度则取决于扫频速度<sup>[6]</sup>。

在生物医学领域应用扫频光纤激光器尤为重要。光学成像技术是生物医学领域的重要技术之一,光学相干层析成像<sup>[7-8]</sup>(OCT)技术作为最新的光学成像技术,相比于其他光学成像技术具有相当大的优势,其主要特点是探测灵敏度高、空间分辨率高以及动态范围大。随着技术不断发展,OCT 技术由最开始的时域 OCT 技术发展到现在谱域 OCT 技术,再发展到现在的扫频源 OCT 技术。扫频源 OCT 技术是目前最前沿的 OCT 技术<sup>[9]</sup>,其关键组成部分就是扫频光源<sup>[10]</sup>。扫频源 OCT 的成像性能由扫频光源的输出特性决定:成像速度取决于扫频光源的扫描速度;轴向分辨能力取决于扫频光源的扫频范围;成像深度由扫频光源瞬时线宽决定;成像灵敏度与扫频光源输出功率有关<sup>[11-13]</sup>。理想的扫频光源需要满足合适的中心波长、较快的扫频速度、较宽的扫频范围和较高的输出功率<sup>[14-15]</sup>。

扫频光纤激光器的研究可分为两类<sup>[16]</sup>,一类是基于色散时延的扫频光纤激光器,利用带宽较宽的脉冲光源输入到长光纤中,通过长光纤产生色散,得到时间延迟的特性,对输出光谱在时间序列上进行编码,达到滤波的目的<sup>[17]</sup>;另一类是较为普遍的基于光学滤波器的扫频光纤激光器,利用光学滤波器的滤波选频特性,将光学滤波器放入谐振腔内或腔外,将输入光进行调谐滤波后输出。相对于基于

色散调制的扫频激光光源,基于光学滤波器调谐的扫频激光光源输出波长较为稳定,应用更为广泛。本文主要介绍了基于光学滤波器的扫频光纤激光器的研究进展及其在各项性能参数上的研究成果。同时,指出其存在的问题并对扫频光纤激光器的发展进行展望。

## 2 基于光学滤波器的扫频光纤激光器

### 2.1 基于光栅多面镜可调谐滤波器的扫频光纤激光器

2003,哈佛大学的 Yun 等<sup>[18]</sup>首次提出了基于光栅多面镜可调谐滤波器的扫频光纤激光器,滤波器的基本结构如图 1 所示。滤波器主要由光栅、多面转镜(24 面)以及由两个透镜组成的望远镜三部分组成,其中光栅用于分光,多面镜用于选频,望远镜系统用于实现光路转换。光栅的中心放在透镜 1 的焦点处,多面镜的中心轴位于透镜 2 的焦点处,当两个透镜之间的焦距改变时,入射到多面转镜上的光斑直径以及会聚角的大小也会随之改变。光栅多面镜滤波器选频机制为:只有垂直于多面镜前镜面的某个波长的光才可以沿原光路返回,通过旋转多面转镜,就可以实现不同波长的选择。光栅多面镜滤波器通过法拉第环形器集成到扩展腔半导体激光器中,如图 2 所示。激光器采用半导体光放大器

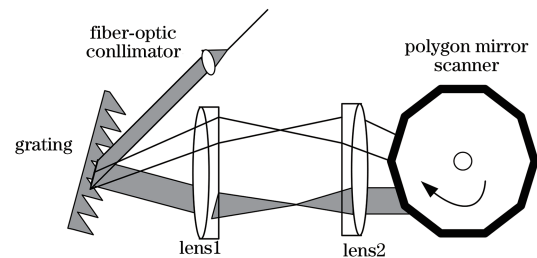


图 1 望远镜型光栅多面镜滤波器结构示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Structure diagram of telescope type grating polygon mirror filter<sup>[18]</sup>

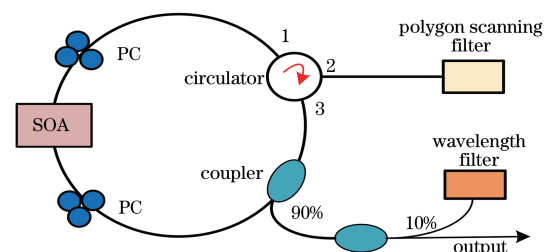


图 2 扫频光纤激光器原理图<sup>[18]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of frequency-swept fiber laser<sup>[18]</sup>

(SOA)作为增益介质,两个偏振控制器(PC)用来调节偏振光的偏振态。光通过环形器1端口进入2端口,然后到达光栅多面镜滤波器进行滤波,再返回2端口,并从3端口到达耦合器。部分光通过耦合器10%端口在腔内循环,另一部分光通过90%端口进入另一个耦合器。通过另一耦合器将10%的激光输出到带宽为0.12 nm的可调谐滤波器并定向到光电探测器上,将90%的光输出。输出激光中心波长为1320 nm,扫频速度为15.7 kHz,扫频范围为73 nm,光功率达到6 mW。

多面转镜的面数越多,对应的扫频速度越快。多面镜由最开始的24面发展到30面<sup>[19]</sup>、40面<sup>[20]</sup>、72面<sup>[21-22]</sup>,甚至达到128面<sup>[23]</sup>。相应的扫频速度从15.7 kHz增加到18.94 kHz、20 kHz、43.2 kHz,最后达到115 kHz。而望远镜系统布局可用于调节光栅色散角度范围与扫描角度范围匹配,进而实现了单向、高速、线性的波长扫描。为进一步拓展滤波器的调谐范围,进而增大扫频光纤激光器的扫频范围、提高输出光功率、简化扫频光纤激光器的结构, Motaghian等<sup>[24]</sup>在2008年提出了一种基于非望远镜型光栅多面镜的扫频光源。该光栅多面镜可调谐滤波器采用了非望远镜型利特罗布局,光由准直镜直接照射在旋转多面镜上,再由多面镜反射到衍射光栅,被衍射的色散光谱按原路返回,结构如图3所示。该调谐滤波器不需要复杂的望远镜系统,因而结构紧凑、易于调节,而且能确保两倍于单望远镜系统型滤波器<sup>[25]</sup>的自由光谱范围。输出激光中心波长为1300 nm,扫频范围达到168 nm,扫频速度达到50 kHz,输出功率达到40 mW。基于非望远镜型光栅多面镜的扫频光源在扫频范围和输出功率上都得到了很大的提升。

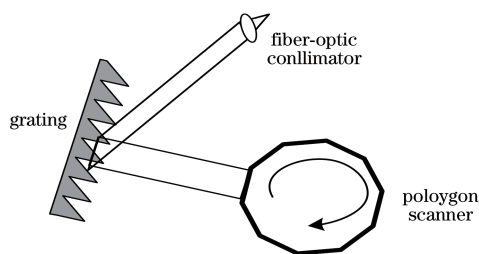


图3非望远镜型光栅多面镜可调谐滤波器结构图<sup>[24]</sup>

Fig. 3 Structure diagram of tunable filter for non-telescope type grating polygon mirror<sup>[24]</sup>

扫频光源的输出功率决定了扫频OCT系统的成像灵敏度,输出功率越高,成像灵敏度越好。2009年,Leung等<sup>[26]</sup>研究了一种基于光栅多面镜的

高功率扫频光纤激光器。采用非望远镜型利特罗结构多面镜滤波器作为波长调谐元件,并且增加了一个端部反射镜,结构如图4所示。将光栅中的衍射光耦合到激光腔中,从而减小了线宽。结合傅里叶域锁模技术,在激光腔中合并两个串行半导体光放大器来实现高输出功率,如图5所示。测得输出激光的中心波长为1329 nm,扫频范围达到111 nm,扫频速度为43 kHz,瞬时线宽为0.14 nm,输出功率达到131 mW,这是目前扫频光纤激光器所达到的最大输出功率。

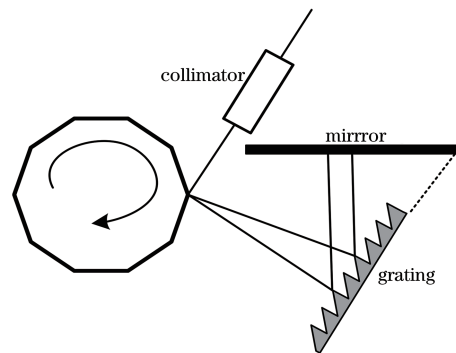


图4非望远镜型光栅多面镜可调谐滤波器结构图<sup>[26]</sup>

Fig. 4 Structure diagram of tunable filter for non-telescope type grating polygon mirror<sup>[26]</sup>

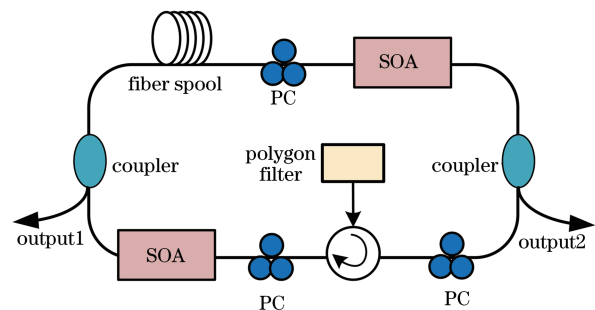


图5基于光栅多面镜的高功率扫频光纤激光器<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Schematic of high power swept fiber laser based on grating polygon mirror<sup>[26]</sup>

基于光栅多面镜调谐滤波器的扫频光纤激光器能够实现快速、单向、线性的扫描,并且结构简单,易于调节。由表1可知,基于光栅多面镜调谐滤波器的扫频光纤激光器扫频速度从15.7 kHz提高到最大的115 kHz;扫频带宽从73 nm增加到最大的168 nm;输出光功率从6 mW增加到131 mW。虽然扫频速度和扫频范围还不够大,但是输出光功率相对较高,最高可达131 mW。扫频光源输出功率越高,扫频源OCT系统成像的灵敏度越高,这对于实现高灵敏度OCT成像具有重要意义。

表 1 基于光栅多面镜调谐滤波器的扫频光纤激光器性能参数  
Table 1 Performance parameters of frequency-swept fiber laser based on grating polygon mirror tuning filter

Year	Center wavelength /nm	Sweep rate /kHz	Sweep range /nm	Output power /mW
2003	1320	15.7	73	6
2005	1325	115.0	80	23
2008	1300	50.0	168	40
2009	1329	43.0	111	131

## 2.2 基于光纤法布里-珀罗可调谐滤波器的扫频光纤激光器

2005年,麻省理工学院小组提出一种新技术,采用光纤法布里-珀罗调谐滤波器(FFP-TF)来选频滤波<sup>[27]</sup>。FFP-TF作为滤波器可以实现极其细微的调制,输出光瞬时线宽窄,可以达到pm级,插入损耗很低。并且FFP-TF是光纤型可调谐滤波器,容易操作且维护简单<sup>[28-30]</sup>。

为了解决激光在谐振腔内建立时间与扫频速度之间的难题,实现高速的扫频激光输出<sup>[31-33]</sup>,2006年Huber等<sup>[34-35]</sup>提出了傅里叶域锁模(FDML)技术。FDML与传统的锁模技术不同,传统的锁模技术是对激光腔内的振幅和相位进行调制,而FDML是对腔内的激光频率进行调制编码<sup>[34-35]</sup>。基于FDML扫频光源采用了光子渡越周期与调谐周期相匹配的长腔谐振技术,扫频速度不受激光在激光腔内建立时间的限制,大大提高了激光扫频速度。其基本结构如图6所示,激光器为环形腔结构,采用SOA作为增益介质,光隔离器保证激光单向传输。首先由SOA辐射出多纵模光,经过光隔离器进入FFP-TF滤波,输出满足当前FFP-TF腔长的纵模光。通过的纵模光继续在激光腔内循环并再次进入SOA得以放大,被放大的纵模光一部分通过耦合器90%端口输出,另一部分通过10%端口回到激光腔内循环。在环形腔内加入一段较长的色散管理光纤作为延迟线,

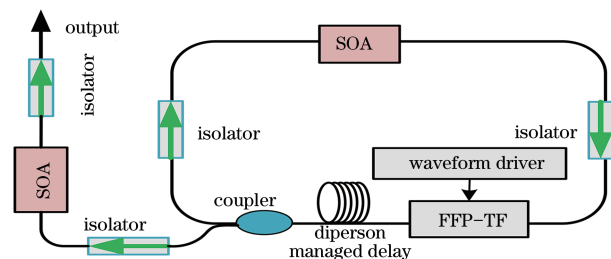


图 6 基于 FDML 的扫频光纤激光器原理图<sup>[34]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of frequency-swept fiber laser based on FDML<sup>[34]</sup>

使得 FFP-TF 的驱动电压的周期恰好等于激光绕环腔传播一周的时间,这样各纵模光经过滤波器在腔内传播一周后再次回到滤波器时,滤波器的腔长正好被调谐到该纵模可以通过的长度,各纵模都被精确锁定,实现连续的扫频激光输出。FDML 扫频光源中心波长为 1300 nm,扫频速度可达 290 kHz、扫频范围为 105 nm,而激光器的直接输出平均光功率为 3 mW。为了获得更高的输出功率,在输出端接入了一个助推 SOA 用于对输出激光再次放大,通过次级放大,获得了 20 mW 的输出功率。

虽然 FDML 扫频光纤激光器在扫频速度上有了很大的提高,但是在谐振腔内加入一段较长的光纤作为延迟线,导致谐振腔长度大大增加,FDML 扫频光纤激光器结构较为复杂。为了缩短延迟光纤的长度从而减小谐振腔长度,2009年 Christoph 等<sup>[36]</sup>提出了次谐波的傅里叶锁模扫频激光器。如图7所示,整个扫频光纤激光器以 sigma 环结构为基础,采用半保偏 FFP-TF 作为滤波器件,FFP-TF 一端采用保偏光纤连接保偏器件构成环形腔,另一端由单模光纤和法拉第旋转镜(FRM)构成线型腔。来自 SOA 的 p 偏振光通过偏振合束器(PBC)耦合到 FFP-TF 中。与 FFP-TF 瞬时通频带相匹配的频率分量通过两段 180 m 长的延迟光纤进行传输。腔体末端的 FRM 将偏振态旋转 90°,光传回 FFP-TF。光纤延迟线中的光来回多次往返,FFP-TF 作为可控开关。除了减少谐振腔长度,次谐波扫频光纤激光器还可以实现光存储和时间复用的扫描,使扫频速度大大提升,最高扫频速度达到 570 kHz。激光器输出激光中心波长为 1317 nm,扫频范围为 95 nm,输出光功率达到 12 mW。

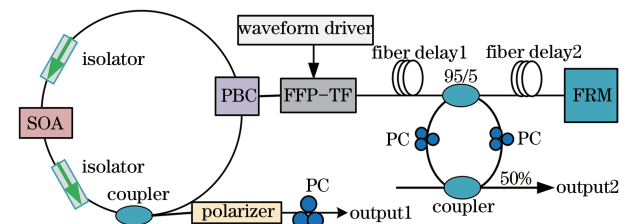


图 7 次谐波 FDML 扫频光纤激光器原理图<sup>[36]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of frequency-swept fiber laser based on subharmonic FDML<sup>[36]</sup>

扫频光纤激光器的扫频范围决定了 OCT 系统的轴向分辨能力。扫频范围越宽,OCT 系统的轴向分辨能力越强。2012年,Bonesi 等<sup>[37]</sup>提出一种基于 FDML 的高速偏振敏感型扫频光纤激光器。激光

器采用环形腔结构,结构如图 8 所示,各个元件由保偏光纤连接,延迟光纤采用标准单模光纤,由 FRM、偏振分束器(PBS)和标准单模光纤构成线型腔。环形腔外部接了三级缓冲放大器,实验过程中只使用了第一级缓冲放大器。输出激光中心波长为 1315 nm,扫频带宽达到 120 nm。2012 年,Choi 等<sup>[38]</sup>提出一种基于 FDML 激光器的光纤布拉格光栅传感系统,高速扫频激光可用于高灵敏度、宽动态范围的动态传感测量。通过调节滤波器的调谐周期与激光在激光腔的往返时间同步,来克服传统的扫频激光器扫频速率的限制。输出激光扫频范围从 1440 nm 到 1580 nm 共 140 nm,3 dB 带宽为 79 nm。

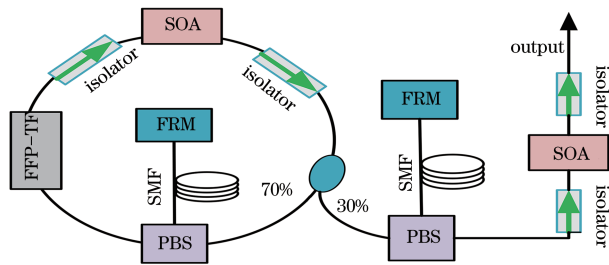


图 8 基于 FDML 的高速偏振敏感型扫频光纤激光器原理图<sup>[37]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of high-speed polarization-sensitive frequency-swept fiber laser based on FDML<sup>[37]</sup>

为了进一步拓展扫频光纤激光器的扫频范围,武汉理工大学汪鹏飞等<sup>[39]</sup>,在 2019 年提出了一种并联 SOA 的 FDML 高速宽带扫频光源,两个并联 SOA 分别为量子点半导体光放大器(QW-SOA)与量子阱半导体光放大器(QD-SOA),结构如图 9 所示。利用 QD-SOA 与 QW-SOA 中心波长和增益范围的差异,实现了对扫频范围的有效拓展,可用扫频范围为 1110~1428 nm 共 318 nm,扫频光谱的半峰全宽为 110 nm,这是一种增大扫频激光光源带宽的有效方法。而且对传统 FDML 结构进行了优化,引入 FRM 搭配光环形器,使实际用到的延时光纤长度缩短了 2 km,而扫频速率并没有因此降低,最高达到 101 kHz。

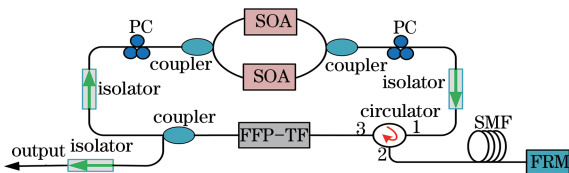


图 9 FDML 高速宽带扫频光纤激光器原理图<sup>[39]</sup>

Fig. 9 Schematic of FDML high-speed broadband frequency-swept fiber laser<sup>[39]</sup>

由表 2 可知,基于 FFP-TP 的扫频光纤激光器的扫频速度从最开始的 290 kHz 发展到最大的 570 kHz,扫频范围从 105 nm 增加到 318 nm。在保证高速扫频的条件下,有效地拓宽了扫频光源的扫频范围,对于提高扫频源 OCT 的成像速度和轴向分辨能力具有重要意义。对于基于 FFP-TP 的扫频光纤激光器而言,采用更快的调谐速度,可以实现更高速的扫频。虽然此类型扫频光纤激光器的扫频速度和扫频范围都较大,但是激光器腔长较长,结构较为复杂。而且输出激光不稳定,光功率相对较低,最高只有 23 mW。

表 2 基于 FFP-TF 的扫频光纤激光器性能参数

Table 2 Performance parameters of frequency-swept fiber laser based on FFP-TF

Year	Center wavelength /nm	Sweep rate /kHz	Sweep range /nm	Output power /mW
2006	1300	290	105	20.0
2009	1317	570	95	12.0
2012	1315	54	120	23.0
2015	1510	43	140	14.0
2019	1269	101	318	7.8

### 2.3 基于声光可调谐滤波器的扫频光纤激光器

上述基于光栅多面镜可调谐滤波器和法布里-珀罗可调谐滤波器的扫频光纤激光器都有一个共同的缺点,即在滤波过程中滤波元件的内部部件会发生机械移动,并且容易受外界环境因素的影响,从而造成输出扫频激光不稳定、重复性差。针对这一问题,可以使用声光调谐滤波器(AOTF)作为滤波元件。AOTF 基于声光效应,通过声波调制来改变输出光的波长,滤波时内部部件不会发生机械移动,受环境因素影响较小,从而保证整个系统的激光输出稳定性较好<sup>[40-42]</sup>。

1997 年, Yun 等<sup>[43]</sup>首次提出了基于 AOTF 的扫频光纤激光器。激光器结合频移反馈和腔内通带滤波器,采用环形腔结构,如图 10 所示。钕镱共掺光纤作为增益介质,对 AOTF 加载一定的射频驱动信号,通过对滤波器峰值波长和滤波器强度的调制,使输出的波长在给定的范围内线性调谐。获得的扫频输出激光中心波长为 1550 nm,扫描范围高达 38 nm,扫频速度达到 7 kHz,瞬时线宽小于 0.1 nm,输出功率高达 100 mW。2014 年, Huo 等<sup>[44]</sup>提出了一种基于 AOTF 的新型线性扫频激光光源。AOTF 由声光偏转器和反射光栅构成,激光器采用 SOA 作为腔内增益介质。扫频激光器中心波长为

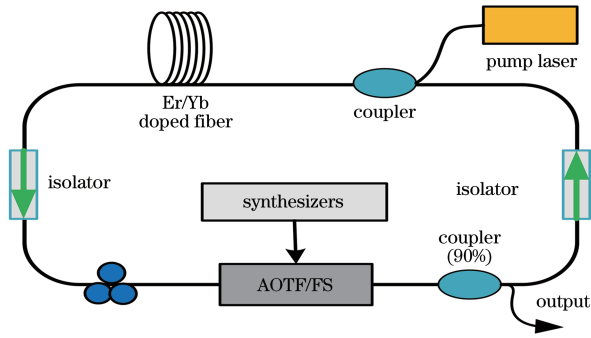


图 10 基于 AOTF 的扫频光纤激光器原理图<sup>[43]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of frequency-swept fiber laser based on AOTF<sup>[43]</sup>

1064 nm, 扫频范围约为 70 nm, 半峰全宽为 42 nm。扫描速度为 20 kHz, 输出光功率为 2.56 mW。

2014 年, 上海理工大学 Chen 等<sup>[45]</sup>提出了一种基于 AOTF 的扫频光源, 采用环形腔结构, 如图 11 所示。该环形腔由两个隔离器、光纤耦合 SOA、光学带通 AOTF 和耦合器组成。两个隔离器用于消除所有无关的腔内反射, 确保环形腔的单向激光。AOTF 的波长范围为 1200~1400 nm, 射频的频率范围是 60~80 MHz, 频率步长为 10 Hz, 频率精度为 0.01%。输出光纤耦合器为 40:60, 光功率的 40% 回到谐振腔, 60% 是输出部分。激光在环形腔中被放大后, 通过耦合器输出。在腔外, 第二光纤耦合 SOA 作为辅助放大器进一步对激光进行放大。在环形腔外端接两个隔离器, 以避免应用系统反射回腔内。扫频激光源在 1308 nm 中心波长实现 140 nm 调谐范围, 扫频速度高达 100 kHz, 输出光功率为 8 mW, 在空气中进行 OCT 成像时的轴向分辨率为 5.4 μm。

基于单一可调谐滤波器的扫频光纤激光器, 输出光的光谱带宽与瞬时线宽之间相互制约, 即不能

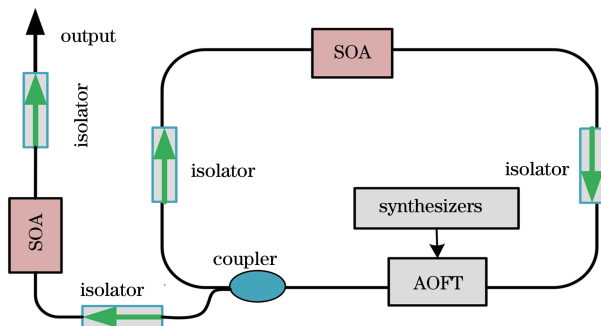


图 11 基于 AOTF 的扫频光纤激光器原理图<sup>[45]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of frequency-swept based on AOTF<sup>[45]</sup>

同时实现较宽的光谱带宽和较窄的瞬时线宽<sup>[46-47]</sup>。应用于 OCT 成像系统时, 直接影响了成像的轴向分辨率和成像深度, 限制了 OCT 系统性能的提升<sup>[48]</sup>。为了突破单一滤波器的这种缺陷, 上海理工大学陈明惠等<sup>[49]</sup>于 2018 年提出了一种双重滤波扫频光源, 即在同一个环形腔内串联接入 AOTF 和 FFP-TF 两种不同滤波器协调滤波, 结构如图 12 所示。为了输出光的稳定, 两个滤波器要满足中心波长重叠且保持同步扫描。其中 AOTF 结构稳定、重复性好、衍射效率高, 且具有较宽的调谐范围和瞬时线宽, FFP-TF 光谱分辨率高、损耗低、连续性好, 且具有较窄的调谐范围和瞬时线宽。两者串联可以克服各自的缺点, 实现宽光谱带宽与窄瞬时线宽的统一, 调谐范围达到 145 nm, 瞬时线宽小于 0.02 nm, 能够较好地提升 OCT 成像的综合性能。输出扫频激光中心波长为 1316 nm, 扫频速度为 1.35 kHz, 输出光功率为 0.48 mW。

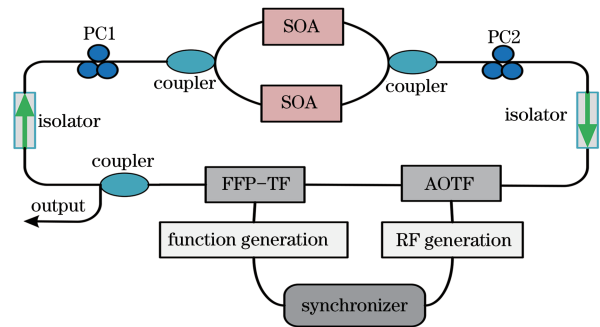


图 12 双重滤波扫频光纤激光器原理图<sup>[49]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of dual-filter frequency-swept fiber laser<sup>[49]</sup>

由于 AOTF 是电控制元件, 波长的调谐不需要机械驱动, 因此提高了系统的稳定性, 其输出激光光谱的重复性也很好。同时, 衍射光的波长由射频信号频率决定并具有严格的线性关系。基于 AOTF 的扫频光纤激光器从被提出到现在, 扫频速度和扫频带宽均得到了提高。由表 3 可知, 扫频速

表 3 基于 AOTF 的扫频光纤激光器性能参数

Table 3 Performance parameters of frequency-swept fiber laser based on AOTF

Year	Center wavelength /nm	Sweep rate /kHz	Sweep range /nm	Output power /mW
1997	1550	7.00	38	100.00
2014	1064	20.00	70	2.56
2015	1308	100.00	140	8.00
2018	1316	1.35	145	0.48

度从 7 kHz 提高到 100 kHz, 扫频带宽从 38 nm 增加到 145 nm, 而且扫频光源中心波长可以覆盖 1.0  $\mu\text{m}$ 、1.3  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$  三个波段。但是由于 AOTF 变化的精度不高, 不能对扫频步长进行精确地控制。

表 4 所示为基于光学滤波器的三种不同类型扫频光纤激光器所实现的最高的性能参数, 分析可知: 基于光栅多面镜可调谐滤波器的扫频光纤激光

器主要优点是输出光功率较高, 最高可达 131 mW; 基于 FFP-TF 的扫频光纤激光器扫频速度和扫频范围都较高, 扫频速度最高可达 570 kHz, 扫频范围最大可达 318 nm; 而基于 AOTF 的扫频光纤激光器主要优点则是输出激光稳定性和重复性较好, 并且中心波长可覆盖 1.0  $\mu\text{m}$ 、1.3  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$  三个波段。三种类型的扫频光纤激光器在性能参数及结构上各有优缺点。

表 4 基于光学滤波器的三种类型扫频光纤激光器最高性能参数对比

Table 4 Comparison of the highest performance parameters of three types of frequency-swept fiber lasers based on optical filters

Laser type	Center wavelength / $\mu\text{m}$	Max sweep rate / kHz	Max sweep range / nm	Max output power / mW
Frequency-swept laser based on polygon filter	1.3	115	168	131
Frequency-swept laser based on FFP-TF	1.3, 1.5	570	318	23
Frequency-swept laser based on AOTF	1.0, 1.3, 1.5	100	145	100

### 3 结 论

本文从基于光栅多面镜调谐滤波器、基于光纤法布里-珀罗可调谐滤波器以及基于声光可调谐滤波器的三种扫频光纤激光器出发, 回顾了基于光学可调谐滤波器的扫频光纤激光器研究进展。从扫频光纤激光器提出到现在, 扫频速度、扫频范围、输出光功率等性能参数都有了很大的提升, 但是不同类型扫频光纤激光器在不同性能参数上优势不同, 缺少一种各项性能参数都较高的扫频光纤激光器。由于不同类型的扫频光纤激光器各有优缺点, 这就要求研究者根据自身需求来设计激光器。随着光纤技术的发展, 高功率光纤激光器日渐成熟, 相信在不久的将来, 一种扫频速度快、扫频范围宽、扫描瞬时线宽窄以及输出激光功率高的扫频光纤激光器必将得以实现。

### 参 考 文 献

- [1] Yao S Z. Research on mode converter and optical fiber laser based on few-mode optical fiber [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. 姚树智. 基于少模光纤的模式转换器和光纤激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [2] Fang D J, Tong X L, Zhang C, et al. High-speed swept laser source based on optical buffer device within ring cavity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011407. 方定江, 童杏林, 张翠, 等. 基于环腔内光学缓存装置的高速扫频激光光源[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011407.
- [3] Qin X W. Studies on frequency shifted and swept technique of multi-wavelength fiber laser[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. 秦旭伟. 多波长光纤激光器的移频与扫频技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] Fu J J. Mode locking pulse fiber laser and its application in optical sensing and optical microwave generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. 傅娇娇. 锁模脉冲光纤激光器及其在微波和传感领域中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] Yun S H, Richardson D J, Richardson D J, et al. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(11): 843-845.
- [6] Takubo Y, Yamashita S. High-speed dispersion-tuned wavelength-swept fiber laser using a reflective SOA and a chirped FBG [J]. Optics Express, 2013, 21(4): 5130-5139.
- [7] Zhu X N, Mao Y X, Liang Y M, et al. Noise analyses of optical coherence tomography systems(II): Fourier domain and time domain OCT systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 457-461. 朱晓农, 毛幼馨, 梁艳梅, 等. 光学相干层析系统噪声分析(II): 时域 OCT 和频域 OCT [J]. 光子学报, 2007, 36(3): 457-461.
- [8] Fercher A F, Drexler W, Hitzinger C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(2):

- 239-303.
- [9] Sun W, Li J N, Qi L Y, et al. Detection of dental root fractures based on endoscopic swept source optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0811002.  
孙伟, 李嘉男, 戚蒴源, 等. 内窥扫频光学相干层析探测牙齿根裂的研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0811002.
- [10] Chang Y, Cui Q F, Piao M X. Optical design of Michelson interferometer based line-field swept source optical coherence tomography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0608002.  
常颖, 崔庆丰, 朴明旭. 迈克耳孙扫频线聚焦光学相干层析系统的光学设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0608002.
- [11] Ryu S Y, You J W, Kwak Y K, et al. Design of a prism to compensate the image-shifting error of the acousto-optic tunable filter[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 17138-17147.
- [12] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [13] Liu G Y, Mariampillai A, Standish B A, et al. High power wavelength linearly swept mode locked fiber laser for OCT imaging [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14095-14105.
- [14] Chinn S R, Swanson E A, Fujimoto J G. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 340-342.
- [15] Luo S T, Fan Y W, Chang W, et al. Boundary region of stomach mucinous carcinoma with swept source optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0517001.  
罗斯特, 范应威, 常玮, 等. 扫频光学相干层析成像应用于判断黏液型胃癌边界区域[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0517001.
- [16] Lu X Q. Development of wide bandwidth swept source with narrow instantaneous linewidth [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.  
卢锡清. 窄瞬时线宽的宽带扫频激光光源的研制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [17] Moon S, Kim D Y. Ultra-high-speed optical coherence tomography with a stretched pulse supercontinuum source[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11575-11584.
- [18] Yun S H, Boudoux C, Tearney G J, et al. High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1981-1983.
- [19] Chong C, Suzuki T, Morosawa A, et al. Spectral narrowing effect by quasi-phase continuous tuning in high-speed wavelength-swept light source [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 21105-21118.
- [20] Yun S H, Tearney G, de Boer J, et al. Pulsed-source and swept-source spectral-domain optical coherence tomography with reduced motion artifacts [J]. *Optics Express*, 2004, 12(23): 5614-5624.
- [21] Lim H, de Boer J F, Park B H, et al. Optical frequency domain imaging with a rapidly swept laser in the 815-870 nm range [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5937-5944.
- [22] Chong C, Morosawa A, Sakai T. High-speed wavelength-swept laser source with high-linearity sweep for optical coherence tomography [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(1): 235-242.
- [23] Oh W Y, Yun S H, Tearney G J, et al. 115 kHz tuning repetition rate ultrahigh-speed wavelength-swept semiconductor laser [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3159-3161.
- [24] Motaghian Nezam S M. High-speed polygon-scanner-based wavelength-swept laser source in the telescope-less configurations with application in optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1741-1743.
- [25] Ko M O, Kim N, Han S P, et al. Characteristics of a wavelength-swept laser with a polygon-based wavelength scanning filter [J]. *Hankook Kwanghak Hoeji*, 2014, 25(2): 61-66.
- [26] Leung M K, Mariampillai A, Standish B A, et al. High-power wavelength-swept laser in Littman telescope-less polygon filter and dual-amplifier configuration for multichannel optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(18): 2814-2816.
- [27] Huber R, Wojtkowski M, Taira K, et al. Amplified, frequency swept lasers for frequency domain reflectometry and OCT imaging: design and scaling principles [J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3513-3528.
- [28] Xu R R. High-speed broad bandwidth swept source at 1  $\mu\text{m}$  [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.  
徐荣荣. 宽带高速 1.0 微米波段扫频激光光源 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [29] Trifanov I, Neagu L, Bradu A, et al. Characterization of



- a fibre optic swept laser source at 1  $\mu\text{m}$  for optical coherence tomography imaging systems[C]//SPIE Bios. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [30] Choma M A, Hsu K, Izatt J A. Swept source optical coherence tomography using an all-fiber 1300-nm ring laser source[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(4):044009.
- [31] Liang Y. Fourier domain mode locking swept laser technology and its application in fiber sensor system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 梁影. 傅立叶域锁模扫频激光器技术及其在传感领域的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [32] Li P, Yang S S, Ding Z H, et al. Research progress in Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207011. 李培, 杨姗姗, 丁志华, 等. 傅里叶域光学相干层析成像技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207011.
- [33] Zhang J, Wang Q, Rao B, et al. Swept laser source at 1  $\mu\text{m}$  for Fourier domain optical coherence tomography [J]. *Applied physics letters*, 2006, 89(7): 073901.
- [34] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3225-3237.
- [35] Huber R, Adler D C, Fujimoto J G. Buffered Fourier domain mode locking: unidirectional swept laser sources for optical coherence tomography imaging at 370,000 lines/s[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(20): 2975-2977.
- [36] Christoph M E, Wolfgang W, Benjamin R B, et al. Subharmonic Fourier domain mode locking [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(6):725-727.
- [37] Bonesi M, Sattmann H, Torzicky T, et al. High-speed polarization sensitive optical coherence tomography scan engine based on Fourier domain mode locked laser: erratum [J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(11):2987-3000.
- [38] Choi B K, Jeon M Y. Resonance fiber bragg grating sensor system based on Fourier domain mode-locking laser [J]. *Hankook Kwanghak Hoeji*, 2012, 23(5): 211-216.
- [39] Wang P F, Tong X L, Deng C W, et al. High-speed broadband swept source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 201101. 汪鹏飞, 童杏林, 邓承伟, 等. 一种高速宽带扫频光源的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 201101.
- [40] Chen M H, Fan Y P, Zhang H, et al. Swept source laser based on acousto-optic tuning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2658-2664. 陈明惠, 范云平, 张浩, 等. 基于声光调谐的扫频光源[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11): 2658-2664.
- [41] Kang S. Review on the principle and applications of acousto-optic effect [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 602-605:2905-2908.
- [42] Li H B, Tan Z W, Kong M L, et al. Linear frequency scanning laser based on acousto-optic modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1201004. 李宏博, 谭中伟, 孔梦龙, 等. 基于声光调制的线性扫频激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1201004.
- [43] Yun S H, Richardson D J, Culverhouse D O, et al. Wavelength-swept fiber laser with frequency shifted feedback and resonantly swept intra-cavity acoustooptic tunable filter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(4): 1087-1096.
- [44] Huo T, Zhang J, Zheng J G, et al. Linear-in-wavenumber swept laser with an acousto-optic deflector for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 247-250.
- [45] Chen M H, Li H, Chen R. Swept laser source based on acousto-optic tunable filter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9297: 92970Q.
- [46] Cao J, Wang P H, Zhang Y, et al. Methods to improve the performance of the swept source at 1.0  $\mu\text{m}$  based on a polygon scanner[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 245-250.
- [47] Hariri S, Moayed A A, Dracopoulos A, et al. Limiting factors to the OCT axial resolution for *in vivo* imaging of human and rodent retina in the 1060 nm wavelength range[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24304-24316.
- [48] Song S Y, Li Z L, Gao Y H, et al. Swept source optical coherence tomography system for transdermal drug delivery imaging by microneedles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0807001. 宋思雨, 李中梁, 高云华, 等. 用于微针经皮给药成像的扫频 OCT 系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0807001.
- [49] Chen M H, Jia W Y, He J T, et al. Development of swept source based on dual filtering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2355-2362. 陈明惠, 贾文字, 何锦涛, 等. 双重滤波扫频光源的研制[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2355-2362.