



DOI: 10.12086/oe.2018.170684

光纤传感用激光光源技术

Iroegbu Paul Ikechukwu¹, 黄仕宏¹, 李雨佳¹, 李阜徽¹, 黄礼刚¹, 高磊¹, 白永忠², 屈定荣², 邱枫², 黄贤滨², 朱涛^{1*}

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

²中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266000

摘要: 光纤传感系统离不开激光光源, 作为被测量信号载体的光波, 激光光源本身的性能, 如激光器的功率稳定性、线宽、相位噪声等参数对光纤传感系统的探测距离、探测精度、灵敏度以及噪声特性起决定性的作用, 因此发展优质激光光源已成为近些年的研究热点。本文简要论述了激光光源在光纤传感领域的发展状况; 重点介绍了窄线宽激光光源、可调谐激光光源以及宽带白光光源在光纤传感技术领域中的应用需求; 概括了现有激光光源在光纤传感中所面临的主要限制因素和关键技术。为了进一步提高光纤传感系统的性能指标, 获得可在任意波段、任意时刻实现的超窄、超稳理想激光光源将是未来光纤传感的一个主要研究方向。

关键词: 光纤传感; 窄线宽激光光源; 可调谐激光光源; 白光光源

中图分类号: O436.3; TN253

文献标志码: A

引用格式: Ikechukwu I P, 黄仕宏, 李雨佳, 等. 光纤传感用激光光源技术[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170684

Laser sources for optical fiber sensing

Iroegbu Paul Ikechukwu¹, Huang Shihong¹, Li Yujia¹, Li Fuhui¹, Huang Ligang¹, Gao Lei¹, Bai Yongzhong², Qu Dingrong², Qiu Feng², Huang Xianbin², Zhu Tao^{1*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China), Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266000, China

Abstract: Optical fiber sensing system depends closely on the quality of the laser source, because laser parameters, such as the power stability, linewidth and phase noise, have a great impact on the performance of the fiber sensing system in such parameters as the maximum measuring distance, precision, sensitivity and noise characteristics. Therefore, the related high quality laser source has caused much attention these years. In this article, a brief review on the development of the laser source for fiber sensing is presented. Laser applications in optical fiber sensing are emphasized with the utilization of the narrow-linewidth laser, tunable laser and broadband light source. Finally, the main limiting factors and kernel technology of laser source for the optical fiber sensing are summarized. In order to achieve high performance of optical fiber sensing, the availability of the ideal ultra-narrow-linewidth and ultra-stable

收稿日期: 2017-10-09; 收到修改稿日期: 2018-02-08

基金项目: 科技部重点项目计划(2016YFC0801202); 国家自然科学基金资助项目(61635004, 61377066, 61705024); 重庆市科委杰青支持项目(CSTC2014JCYJJQ40002); 中央高校基础研究基金资助项目(106112017CDJZRPY0005)

作者简介: Ikechukwu I P(1994-), 男, 博士研究生, 主要从事激光器线宽压缩技术方面的研究。

E-mail: iroegbupaulikechukwu@yahoo.com

通信作者: 朱涛(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光器及调控技术、光电功能材料及功能器件和光纤传感技术等方面的研究。E-mail: zhutao@cqu.edu.cn

laser, which could be tuned at a desired wavelength span and tuning rate, will be definitely one of the main research directions of the future optical fiber sensing.

Keywords: optical fiber sensing; narrow-linewidth laser source; tunable laser; broadband white light source

Citation: Ikechukwu I P, Huang S H, Li Y J, *et al.* Laser sources for optical fiber sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170684

1 引言

光纤传感技术是伴随着光纤技术和光纤通信技术发展起来的一种传感技术,其已成为光电技术中最活跃的分支之一。光纤传感系统主要由激光器、传输光纤、传感元件或调制区、光检测等部分组成。描述光波特性的参量有光强、波长、相位、偏振态等,这些参量在光纤传输中都可能受外界影响而发生改变。如当温度、应变、压力、电流、位移、振动、转动、弯曲以及化学量等对光路产生影响时,这些参量发生相应变化。光纤传感就是根据这些参量随外界因素的变化关系来检测各相应物理量大小^[1-3]。

光纤传感系统使用的光源种类很多,可分为相干光源和非相干光源两大类,非相干光源主要有白炽光与发光二极管,相干光源包括固体激光器、液体激光器、气体激光器、半导体激光器以及光纤激光器。下面主要针对近几年在光纤传感领域应用广泛的激光光源进行分析:窄线宽单频激光器、单波长扫频激光器以及白光激光器。

1.1 对窄线宽激光光源的需求

光纤传感系统离不开激光光源,作为被测量信号载体的光波,激光光源本身的性能,如功率稳定性、激光线宽、相位噪声等参数对光纤传感系统的探测距离、探测精度、灵敏度以及噪声特性起决定性的作用。近年来,随着长距离超高分辨率光纤传感系统的发展,学术界和工业界对激光器小型化后的线宽性能提出了更加苛刻的要求,主要表现在:相干光频域反射(optical frequency domain reflection, OFDR)技术通过相干检测技术对光纤的后向瑞利散射信号进行频域分析,具有覆盖范围广(数千米),分辨率高(毫米级的分辨率)、灵敏度高(可达-100 dBm)等优点,已成为分布式光纤测量和传感技术中具有广泛应用前景的技术之一^[4]。OFDR技术的核心是采用可调谐光源实现对光频进行调谐,因此激光器的性能决定了OFDR探测范围、灵敏度以及分辨率等关键因素,当反射点距离接近相干长度时,其拍频信号的强度将以系数 π/τ_c 呈指

数衰减。对于频谱形状为高斯型的光源,若在保证拍频有90%以上的可见度,光源线宽与系统可达到的最大传感长度之间的关系为 $L_{\max} \sim 0.04v_g/f$,这意味着对于长度为80 km的光纤,需要光源的线宽小于100 Hz^[5-6]。此外,其它应用研究的开展对光源的线宽也提出了较高要求,例如:在光纤水听器系统中,光源的线宽决定了系统噪声,也决定了系统的最小可测信号^[7];在布里渊光时域反射仪(Brillouin optical time domain reflector, BOTDR)中,温度和应力的测量分辨率主要由光源的线宽决定^[8];在谐振腔光纤陀螺中,压缩光源线宽能提高光波的相干长度,从而提高谐振腔的精细度和谐振深度,降低谐振线宽,保证光纤陀螺的测量精度^[9-10]。

1.2 对扫频激光光源的需求

单波长扫频激光器具有灵活的波长调谐性能,可替代多个输出固定波长的激光器,降低系统的搭建成本,是光纤传感系统中不可或缺的部分。例如,在痕量气体光纤传感中,不同种类的气体具有不同的气体吸收峰。为了保证测量气体足够时的光吸收效率,实现更高的测量灵敏度,需要将传感激光源的波长对准气体分子的吸收峰。能够探测的气体种类本质上是由传感光源的波长决定的。因此具有稳定宽带调谐性能的窄线宽激光器在此类传感系统中具有更高的测量灵活性。又例如在一些基于光频域反射分布式光纤传感系统中,需要将激光器进行快速的周期性扫频,实现光信号的高精度相干探测解调,因此对激光光源的调制速率有比较高的要求,通常需要可调激光器的扫频速度达到10 pm/ μ s^[11]。除此之外,波长可调谐窄线宽激光器还可广泛应用于激光雷达、激光遥感以及高分辨率光谱分析等传感领域^[12-13]。为了满足光纤传感领域对单波长激光器调谐带宽、调谐精度以及调谐速度的高性能参数要求,近年来,研究可调谐窄线宽光纤激光器的总体目标是在追求激光线宽超窄、相位噪声超低、输出频率和功率超稳的基础上,还要在更大的波长范围内实现高精度调谐。

1.3 对白光激光光源的需求

在光学传感领域,高质量的白光激光对系统性能的提升具有重要意义,白光激光器的光谱覆盖范围越宽,其在光纤传感系统的应用就越广泛。例如,利用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)构建传感网络时,可以采用光谱分析法或者可调谐滤波器匹配法进行解调^[14],前者是利用光谱仪直接对网络中的每个FBG谐振波长进行测试,后者是利用参考滤波器跟踪和校准传感中的FBG,这两种方法均需要宽带光源作为FBG的测试光源。由于每个FBG接入网络均会产生一定的插入损耗,而且具有0.1 nm以上的带宽,因此对多个FBG进行同时解调需要功率高、带宽大的宽带光源。又例如,利用长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)进行传感时,由于其单个损耗峰的带宽在10 nm量级^[15],为了准确表征其谐振峰特性,需要带宽足够宽且光谱较为平坦的宽谱光源。尤其是利用声光效应构建的声致光纤光栅(acoustic fiber grating, AIFG)^[16],可以利用电调谐方式实现谐振波长的调谐范围达到1000 nm^[17],那么对这种超宽调谐范围的光纤光栅进行动态测试就对宽谱光源的带宽范围提出了极大的挑战。与此类似,近年来,倾斜布拉格光纤光栅在光纤传感领域也得到了广泛应用^[18],由于其多峰损耗谱特性,波长分布范围通常可达到40 nm,其传感机制通常是需比较多个透射峰间的相对移动,因此需要对其透射谱进行完整测量,对宽谱光源的带宽和功率均提出了较高的要求。

2 国内外研究现状

2.1 窄线宽激光光源

2.1.1 窄线宽半导体分布式反馈激光器

2006年,Cliche等人利用电学反馈的方法将MHz量级的半导体分布式反馈激光器(distributed feedback laser,DFB)降低到kHz量级^[19];2011年,Kessler等人利用低温高稳单晶腔结合有源反馈控制获得40 MHz的超窄线宽激光输出^[20];2013年,Peng等人利用腔外法珀腔(Fabry-Perot,FP)反馈调节的方法获得15 kHz线宽的半导体激光输出^[21],电学反馈方法主要利用的是Pond-Drever-Hall稳频反馈使得光源激光线宽得到压缩。2010年,Bernhardi等人在氧化硅基底上制作1 cm的掺铟氧化铝FBG,获得线宽约为1.7 kHz的激光输出^[22]。同年,Liang等人针对半导体激光器利用高Q回音壁谐振腔形成的后向瑞利散射自注入反馈进行线

宽压缩,如图1所示,最终获得160 Hz的窄线宽激光输出^[23]。

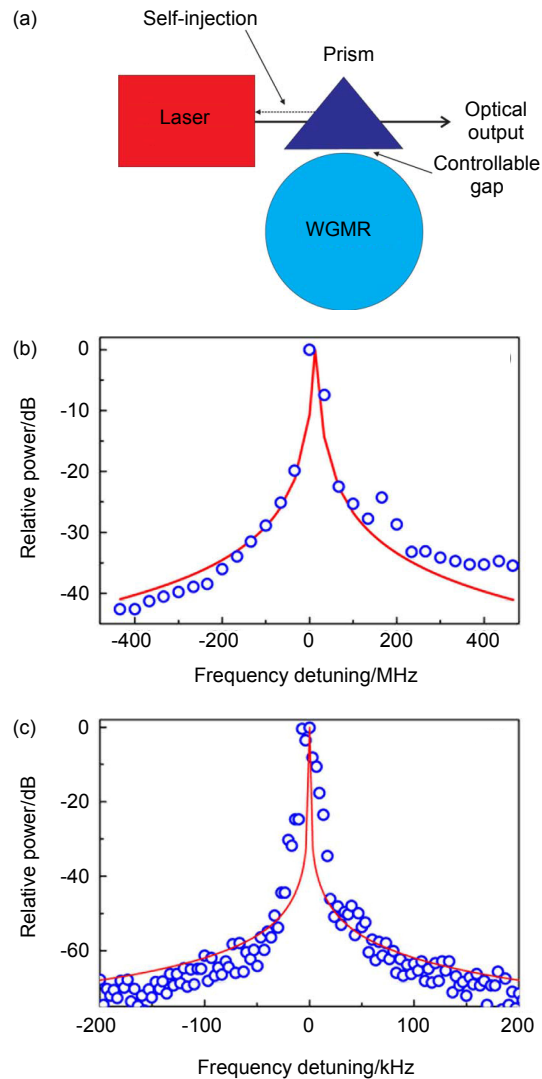


图1 (a) 基于回音壁微腔自注入瑞利反馈的激光器线宽压缩示意图;(b) 线宽为8 MHz的半导体激光器频谱;(c) 线宽为160 Hz窄线宽激光器频谱^[23]

Fig. 1 (a) Diagram of semiconductor laser linewidth compression based on the self-injection Rayleigh scattering of external whispering gallery mode resonator; (b) Frequency spectrum of the free running semiconductor laser with linewidth of 8 MHz; (c) Frequency spectrum of the laser with linewidth compressed to 160 Hz^[23]

2017年,本文课题组研究了基于双腔反馈的DFB线宽压缩方式,将常用MHz量级DFB激光器压缩至kHz量级,如图2所示,为广泛应用的DFB激光提供了一种简单、有效、低成本的线宽压缩方式^[24],对于特定波长激光器也可以直接用1或2支FBG替换双环,其基本原理是一样的。

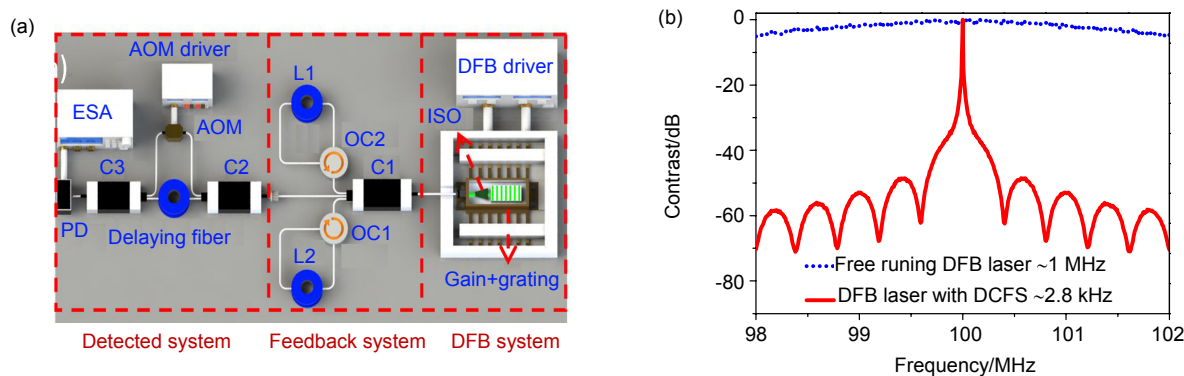


图 2 (a) 双腔反馈系统原理图; (b) 有(实线)无(虚线)双腔反馈结构输出功率谱^[24]

Fig. 2 (a) Schematic diagram of DFB dual-cavity self-feedback structure; (b) Output power spectra with (red line) or without (blue line) dual-cavity feedback structure^[24]

2.1.2 窄线宽光纤激光器

对于线形腔光纤激光器,基本采用缩短谐振腔长度以增大纵模间隔来获取单纵模窄线宽激光输出。2004年,Spiegelberg等人利用DBR短腔法得到线宽为2 kHz的单纵模窄线宽激光输出^[25]。2007年,Shen等人使用2 cm的重掺铒硅光纤,在Bi-Ge共掺的光敏光纤上刻写FBG,并将其与有源光纤熔接构成了一个紧凑线形腔,使得其激光输出线宽小于1 kHz^[26]。2010年,Yang等人利用2 cm高掺杂短线形腔结合窄带FBG滤波器,得到线宽小于2 kHz的单纵模激光输出^[27],

该团队在2014年利用短线形腔(虚拟折叠环形谐振腔)结合FBG-FP滤波器得到了更窄线宽的激光输出,如图3所示^[28]。2012年,Cai等人采用1.4 cm短腔结构获得了输出功率大于114 mW,中心波长在1540.3 nm的保偏激光输出,其线宽为4.1 kHz^[29]。2013年,Meng等人利用全保偏器件短环形腔的保偏掺铒光纤的布里渊散射获得输出功率为10 mW的单纵模、低相位噪声激光输出^[30];2015年,该团队利用45 cm掺铒光纤构成的环形腔作为布里渊散射增益介质,获得低阈值、窄线宽激光输出^[31]。

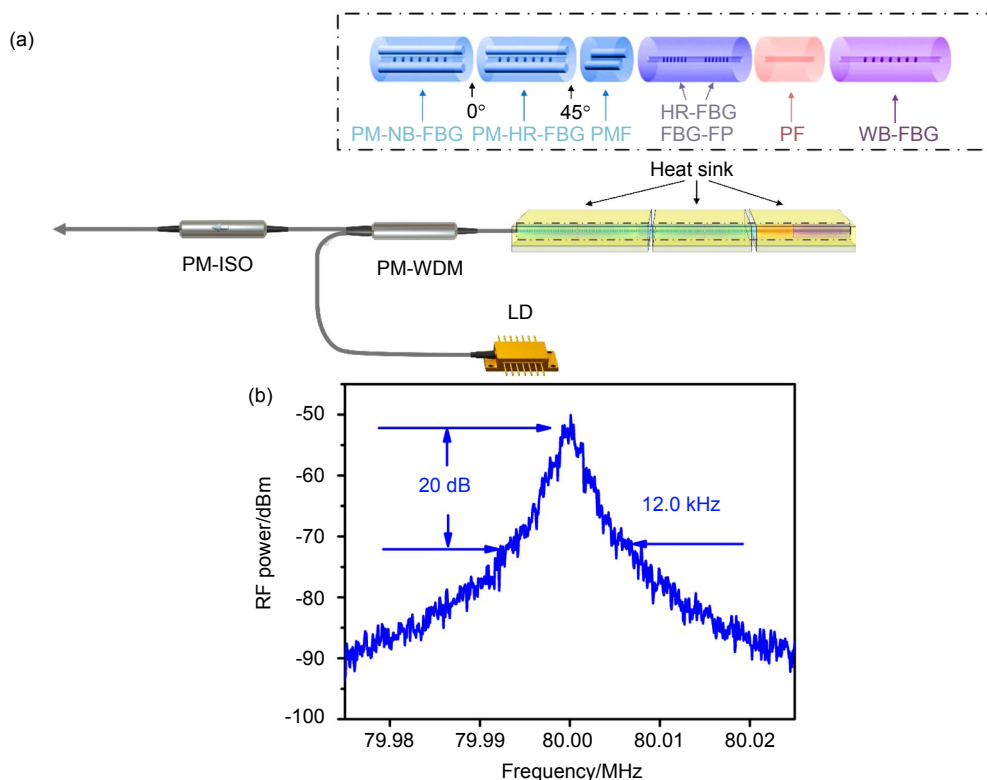


图 3 (a) 虚拟折叠环形谐振腔原理图; (b) 延迟光纤长度为 97.6 km 的自外差线型^[28]

Fig. 3 (a) Schematic drawing of the SLC fiber laser; (b) Lineshape of the heterodyne signal measured with 97.6 km fiber delay^[28]

通过对能带结构和能级斯塔克分裂的深入分析，本文课题组指出由于某能级电子消耗之后，其余能级电子会快速弛豫到消耗能级，如果能改变激光每次循环谐振时激光的线宽就可以使激光中心频率处每次都获得最大程度的相干放大，而旁边频率信号逐渐弱化从而达到深入窄化激光线宽的作用。2010年，朱涛教授在渥太华大学通过测试单模光纤(SMF-28e)、大有效面积光纤(large effective area fiber, LEAF)和保偏光纤(polarization maintaining optical fibre, PMF)在不同泵浦功率下的瑞利散射，发现瑞利散射具有压缩激光线宽的作用^[32]。2012年，利用非均匀光纤制作窄线宽环形激光器，研究发现在环形腔光纤激光器中，瑞利散射效应如同一个窄带滤波器，利用这种非线性效应可以进行纵模的选择从而实现自增益的窄线宽激光器，其3 dB线宽为4 kHz^[33]。2013年，本文课题组采用微拉锥的方式改变单模光纤纤芯与包层的形状、尺寸，从而限制声波的传播，极大地抑制了光纤中的横向声模，提高了受激布里渊的阈值，并将其用于超窄线宽光纤激光器中。最终激光输出边模抑制比可达50 dB，激光线宽低至800 Hz^[34]。2014年，本文课题组利用高瑞利散射结构结合光自注入的方式获得线宽为130 Hz以及边模抑制比为75 dB的超窄线宽激光输出(图

4)^[35]。Bao 等人在2011~2014年期间，亦是利用后向瑞利散射技术获得窄线宽激光输出^[36-38]。通过理论分析和系列实验研究结果可见，累积的瑞利散射信号就是实现激光器频率线宽深入窄化的有效物理方法之一。

2.2 单波长扫频激光光源

实现激光器单波长扫频本质上是对激光腔内器件的物理性能(通常是运行带宽的中心波长)的调控，从而实现了对腔内的震荡纵模进行控制和选择，以达到对输出波长进行调谐的目的。基于此原理，早在上世纪80年代，可调谐光纤激光器的实现主要通过将激光器的一个反射端面换成反射式衍射光栅，通过衍射光栅的手动旋转调谐实现激光腔模式的选择^[39]。1990年，Lwatsuki 等人在自由运行的光纤环形激光腔中加入光纤窄带宽滤波器件，首次真正意义上实现了单波长输出的掺铒光纤激光器^[40]。在此基础上，Madea 等人利用液晶的法珀标准具作为激光模式选择的滤波器，用电调的方式改变液晶滤波器的运行带宽，实现了输出激光在1523 nm~1568 nm范围的波长调谐，而且输出激光的线宽小于100 kHz^[41]。1991年，Smith 等人首次利用集成的声光可调滤波器，基于声场调控的方式，在中心波长为1545 nm处实现了40 nm的调谐范围，

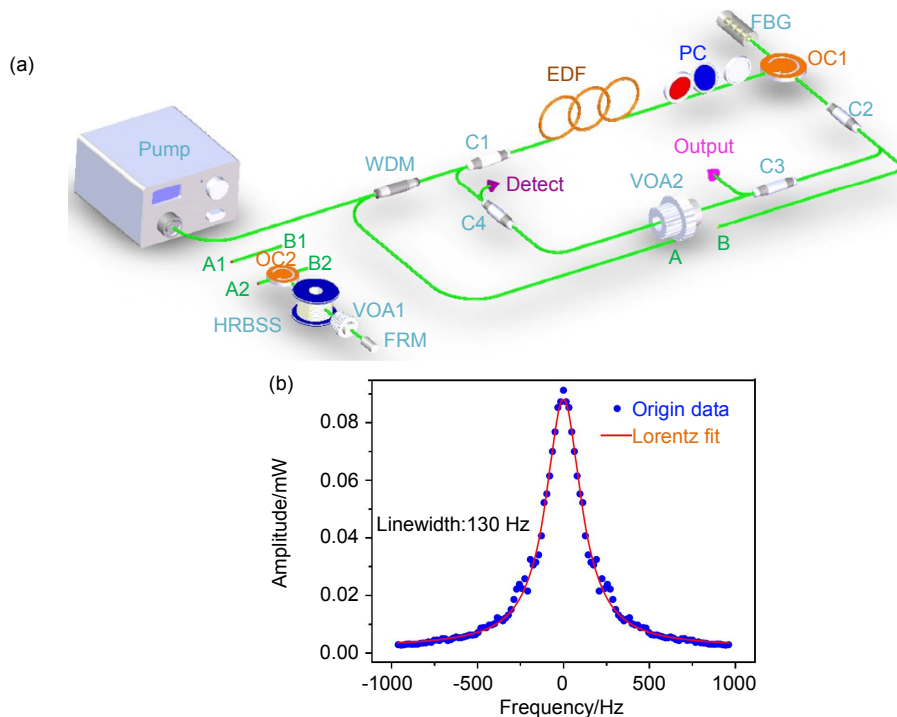


图4 (a) 基于瑞利散射结合自注入反馈系统结构图; (b) 输出功率谱以及其对应洛伦兹拟合线宽^[35]
 Fig. 4 (a) Schematic diagram of fiber ring laser combing RBS and self-injection feedback; (b) The output power spectrum and its Lorentz fitting linewidth for the narrowest laser linewidth^[35]

并且单纵模的瞬时线宽仅为 10 kHz^[42]。同年,美国的 Zyskind 课题组利用双 F-P 滤波器在掺铒光纤激光腔中实现了宽带可调谐窄线宽激光输出,输出激光的线宽小于 5.5 kHz^[43]。2006 年, Lin 等人改变激光腔输出耦合器的耦合比,在 L 波段实现了输出激光波长调谐^[44]。2013 年, Zhang 等人利用 FP-LD 的自注入反馈结构得到线宽为 13 kHz 的激光输出,该结构用可调谐滤波器将 FP-LD 形成的多波长中的某个波长选出来然后经过环形腔的循环放大再注入 FP-LD,使得选出的这个波长获得高增益,抑制 FP-LD 其它波长,获得可调谐激光输出^[45]。

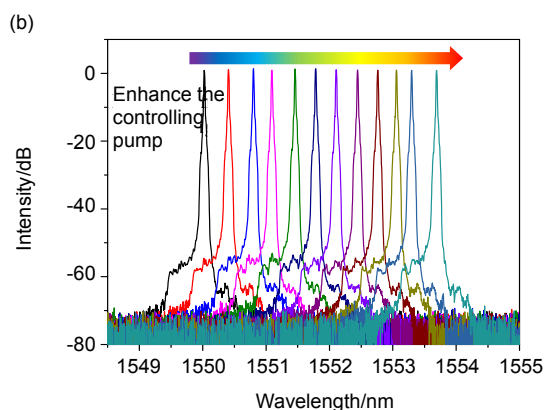
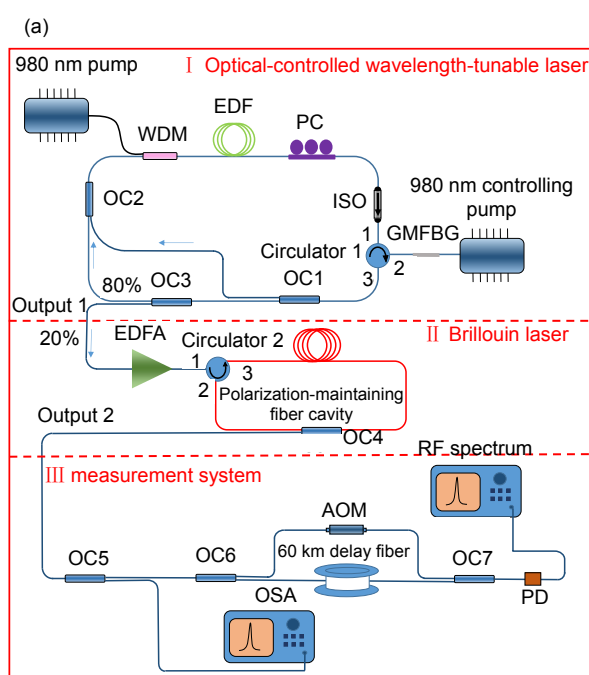


图 5 (a) 光控波长可调谐窄线宽激光器的实验装置图及其输出测试系统; (b) 随着控制光功率的增加输出光谱的变化^[48]

Fig. 5 (a) Experimental setup of the optical-controllable wavelength-tunable fiber laser and the measurement system; (b) Output spectra at output 2 with the enhancement of the controlling pump^[48]

2011 年, Zhu 等人利用可调谐滤波器实现单波长的窄线宽可调谐激光输出^[46],并于 2016 年将瑞利线宽压缩机制用于双波长的压缩,即对 FBG 施加应力实现双波长激光的调谐,同时对其输出的激光线宽进行监测,获得了波长调谐范围为 3 nm,线宽约为 700 Hz 的双波长稳定输出^[47]。2017 年, Zhu 等人利用石墨烯和微纳光纤布拉格光栅制成全光可调谐滤波器,并结合布里渊激光压窄技术,在 1550 nm 附近利用石墨烯的光热效应实现了激光线宽低至 750 Hz,在 3.67 nm 波长范围内 700 MHz/ms 的光控快速精确扫描,如图 5 所示^[48]。以上的波长调控手段基本上通过直接或间接改变激光腔内器件的通带中心波长以实现激光模式的选择。

窄线宽激光波长调谐技术亦可通过飞秒激光的选模机制获得。飞秒激光的形成是由于许多的激光纵模之间的相位锁定。但是对于其中的某一纵模而言,它本身的线宽远远小于自由运行的激光纵模,可以小到 MHz 量级^[49]。因此如果能在飞秒频率梳中选出其中的单一纵模,便可获得极窄线宽激光输出,而且飞秒激

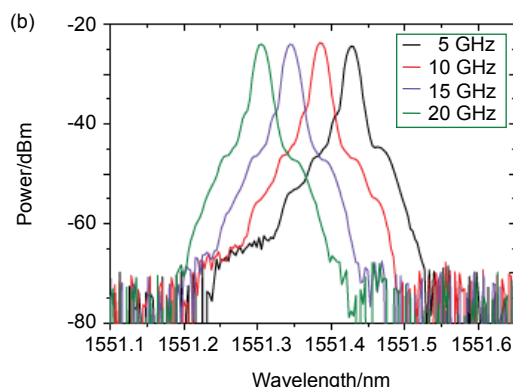
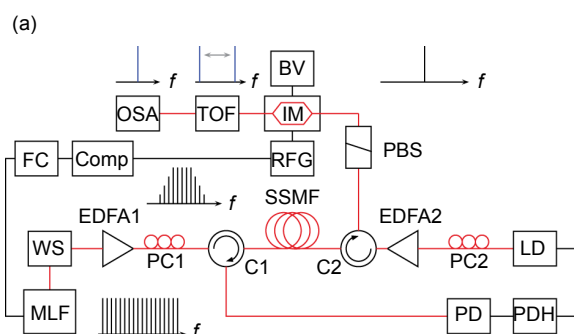


图 6 (a) 基于飞秒频率梳选频的可调谐窄线宽激光器; (b) 调谐输出光谱^[50]

Fig. 6 (a) The tunable narrow-linewidth fiber laser based on the frequency-selection from femtosecond frequency combs; (b) The tuning output spectrum^[50]

光的宽光谱还可以为激光波长调谐提供很宽的自由度。基于这一思想,2014年,如图6所示,Al-Taiy等人利用受激布里渊散射的偏振诱导的窄带宽效应成功从重复频率为100 MHz,20 dB光谱宽度为90 nm的光纤锁模激光器中选出了单一纵模^[50],将腔内泵浦激光器的波长偏移作为粗调环节,利用腔外的载波抑制单边带调制器作为精调环节,在整个飞秒频率梳范围内实现了波长的精密调谐,而且实现的激光输出线宽小于100 Hz。2016年,Wang等人利用半导体非线性光放大器中的反向四波混频效应实现了激光的单模运转,并将此放大器与光纤激光腔相结合,通过可调谐滤波器成功输出线宽低于10.1 kHz的窄线宽激光,实现了48 nm范围的波长调谐^[51],其实验装置如图7所示。随着更多种类的特种掺杂光纤以及更宽带的光纤器件的出现,如掺铥光纤、掺镱光纤等,可调光纤激光器的调谐范围可以得到极大拓宽,已经不仅仅局限于C波段,而且以上所阐述的波长调控以及线宽压缩机制,在其它波段依然适用。例如,Li课题组提出了将掺铥光纤激光腔与全光纤滤波器相结合,在2 μm波段实现了超过200 nm的宽带调谐^[52]。

2.3 白光激光光源

白光光源的发展经历了卤钨灯、氙灯、半导体激光器、超连续谱光源等各个阶段。特别是超连续谱光源,在具有超强瞬态功率的飞秒或者皮秒脉冲的激励下,波导中产生各阶非线性效应,频谱被极大地展宽,能够覆盖从可见光到近红外波段,且具有很强的相干性。此外,通过调控特种光纤的色散和非线性值,其光谱甚至可以延展到中红外波段。此类激光光源在诸多领域得到了极大的应用,如光学相干断层扫描、气体探测、生物成像等。受光源和非线性介质的限制,早期超连续谱主要由固体激光器泵浦光学玻璃,产生可见光范围内的超连续谱^[52]。此后,光纤以其极大的非线性系数和极小的传输模场,逐渐成为产生宽带超连续谱的优良介质。其中的主要非线性效应包括四波混频、调制不稳定、自相位调制、交叉相位调制、孤子分裂、拉曼散射、孤子自频移等,且根据激励脉冲的脉宽和光纤的色散不同,各个效应所占比重也各不相同。总的来说,现在超连续谱光源主要朝着提高激光功率和拓展光谱范围发展,且注重对其相干性控制。

图8为基于飞秒脉冲泵浦光子晶体光纤产生超连

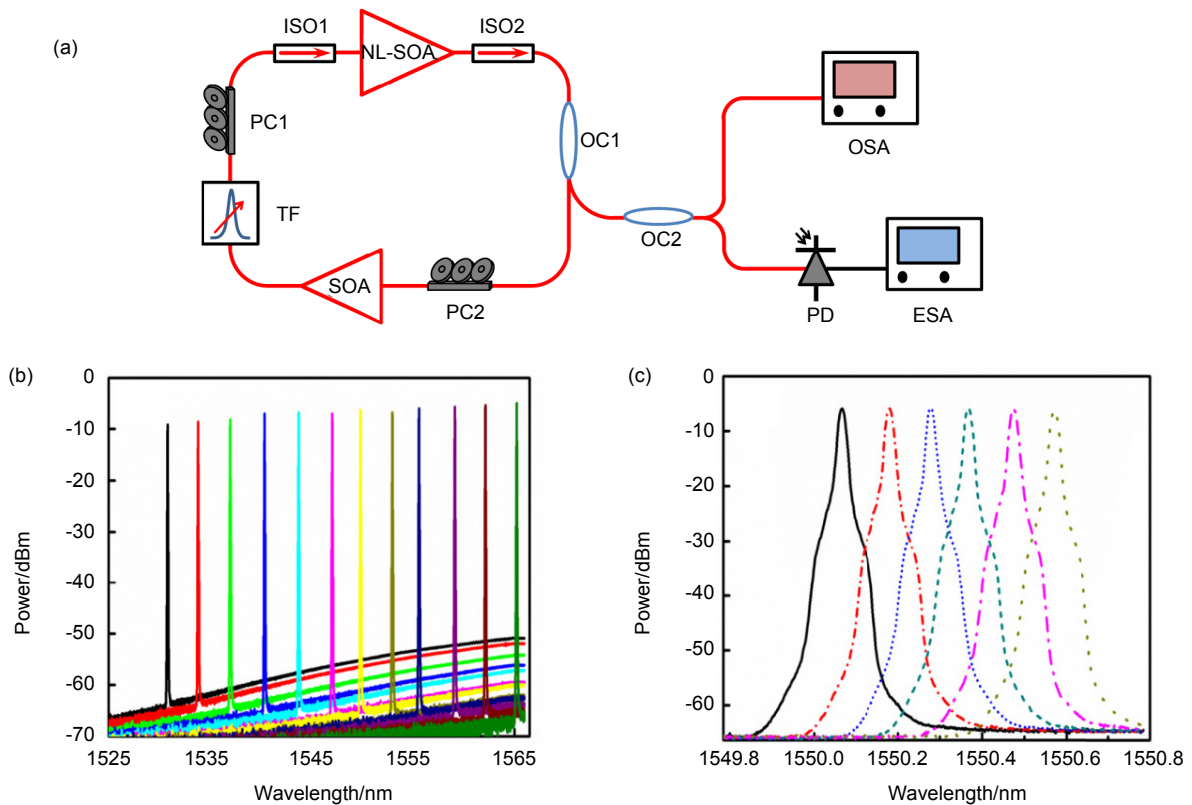


图7 (a) 基于反向四波混频的可调谐窄线宽激光器; (b), (c) 调谐输出光谱^[51]

Fig. 7 (a) The tunable narrow-linewidth fiber laser based on the reversed four-wave mixing; (b), (c) The tuning output spectrum^[51]

续谱的相关结果^[53-54]。图 8(a)为 75 cm 光子晶体光纤端面,其中纤芯直径大约 2.6 μm ,非线性系数是 2.210^{-19} m^2/W ,损耗约为 1 dB/m, 1550 nm 波段色散约为 -30 ps/(nm·km),零色散波长约为 1300 nm。激励源脉宽

为 100 fs,中心波长为 1550 nm,重频为 80 MHz,平均功率为 200 mW。将泵浦飞秒脉冲注入光子晶体光纤之后,产生的超连续谱波长从 350 nm 延伸到 2200 nm,如图 8(b)所示。

同理,利用多模光纤可以激发更为复杂的超连续谱,通过适当掺杂,其光谱宽度甚至可以从可见波段延伸到 6.0 μm 。图 9 所示为利用 500 fs 激光激励 1 m 渐变多模光纤产生的超连续谱理论值^[55]。其中脉冲能量为 300 nJ,中心波长 1550 nm。该多模光纤的纤芯直径约为 62.5 μm ,数值孔径为 0.275。在实际测试中,受测量设备限制,其各个波段的光谱如图 10 所示。从

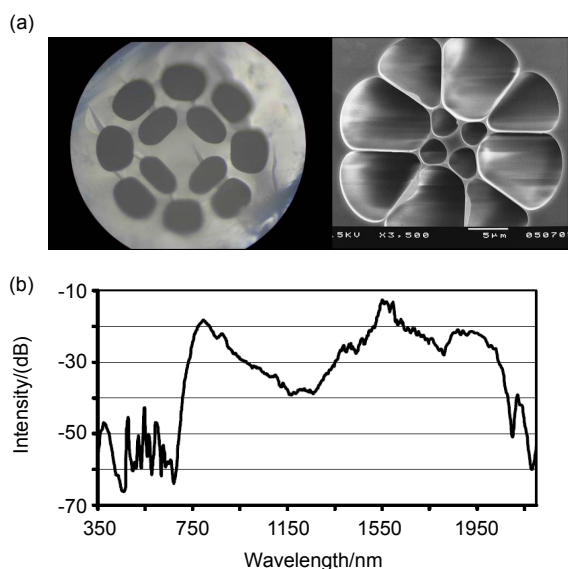


图 8 (a) 光子晶体光纤截面图; (b) 对应超连续谱^[54]
Fig. 8 (a) Cross section of the PCF; (b) Corresponding super-continuum^[54]

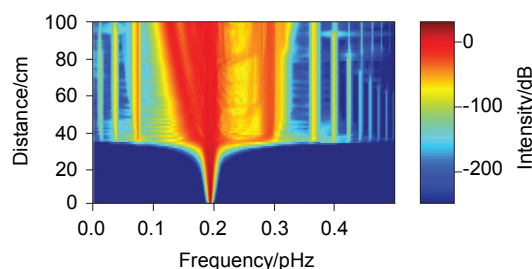


图 9 1 m 多模光纤的光谱演变图^[55]
Fig. 9 Total spectrum evolution through the 1 m fiber^[55]

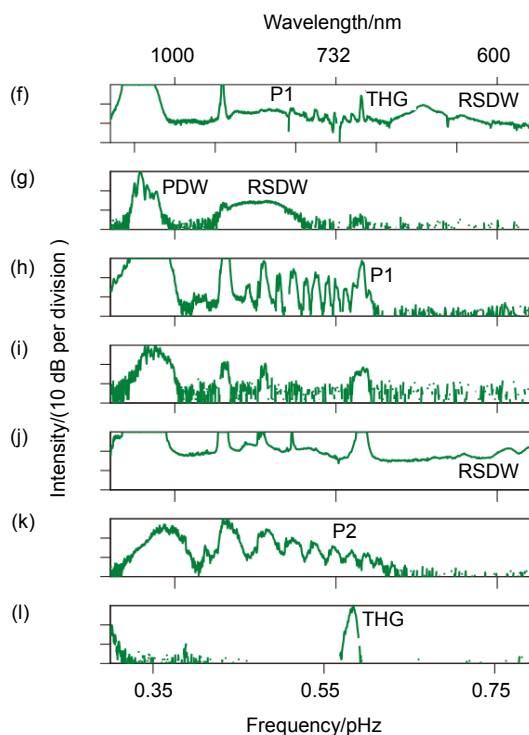
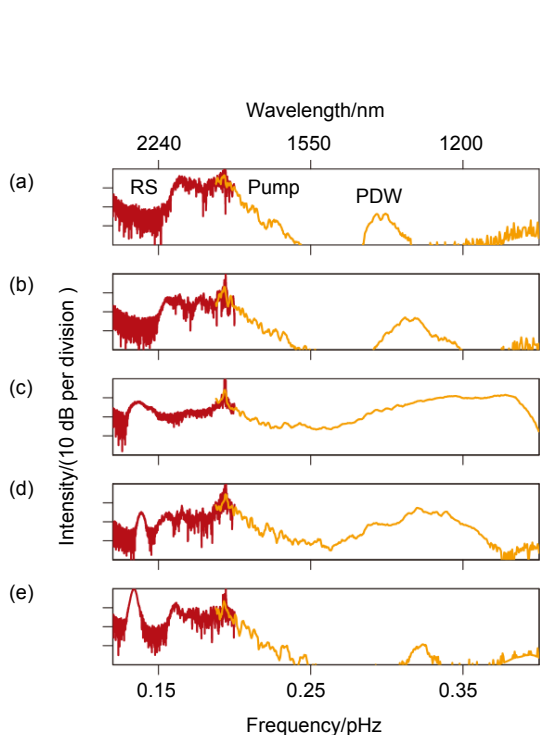


图 10 泵浦能量为 120 nJ (a)和 180 nJ (b) 时对应的光谱; (c)~(e) 通过调整初始条件,光谱平整度和带宽被优化(泵浦能量为 150 nJ); (f)~(l) 不同初始条件下可见光波段的光谱分布(泵浦能量为 150 nJ)^[55]
Fig. 10 (a), (b) Typical behavior for increasing energy (120 nJ to 180 nJ); (c)~(e) By adjusting the initial spatial excitation, we optimize the spectral uniformity and bandwidth (the energy for each plot is ~ 150 nJ). (f)~(l) Visible spectra (all ~ 150 nJ)^[55]

中可知,超连续谱生成过程中分别包括色散波、拉曼孤子以及低阶重频。此时,受复杂的相位匹配条件影响,各横模的能量能够发生耦合,这为高能量、宽范围的超连续谱光源提供了可靠的产生途径。

3 现状分析

上一节中主要介绍了用于光纤传感的激光光源的发展状况,主要包含窄线宽激光器,单频可调谐激光器以及白光激光器。

为了提高光学传感系统的测量范围、精度等,需要获得相干长度(表征激光线宽)更长,相位噪声(表征激光频率稳定性)以及强度噪声(表征激光功率稳定性)更低的窄线宽激光光源,故对于窄线宽激光器,其发展趋势应是利用新方法或新机制来获取超稳(噪声超低)、超纯(线宽超窄)的激光光源。为了提高传感系统测量移植性、探测范围和精度(相干探测解调、激光雷达等),在获得低噪声窄线宽激光器输出的前提下还需要实现激光器波长的可调谐。故对于单频可调谐激光器,其发展趋势应是拓展其频率的调谐范围,提高频率的调谐精度,以及缩短其频率调谐时间。为了拓展可调谐激光器的调谐范围,必须增大激光器本身的增益谱宽,故白光激光器的发展趋势主要是利用非线性效应进一步拓展其光谱宽度,覆盖其光学传感所需的光谱。

4 总结

本文总结回顾了用于支撑光纤传感技术的激光光源,主要包括窄线宽激光器、单频可调谐激光器以及宽带白光激光器。详细介绍了这几种激光器在光纤传感领域的应用需求及其发展现状,通过分析其需求以及其发展状况,总结出用于光纤传感所需的理想激光光源是在任意波段、任意时刻都能实现超窄、超稳的激光输出。故我们分别从窄线宽激光器、可调谐窄线宽激光器以及增益带宽较宽的白光激光器入手,通过分析其发展脉络从而找出一条实现光纤传感所需理想激光光源的有效途径。

参考文献

- [1] Zhang S, Wang Z, Liu M H, et al. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2007(3): 1-3.
张森, 王臻, 刘孟华, 等. 光纤传感技术的发展及应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2007(3): 1-3.
- [2] Liao Y B, Li M. The development of optical fiber sensors[J]. *Sensor World*, 2004, 10(2): 6-12.
- [3] Jia F X, Ding Z L, Yuan F, et al. Real-time laser range finding system for moving target based on all-phase fourier transform spectrum analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2928-2934.
贾方秀, 丁振良, 袁峰, 等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2928-2934.
- [4] Zhang X P. All Distributed optical Fiber Sensing Technology[M]. Beijing: Science Press, 2013.
张旭革. 全光纤分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [6] Passy R, Gisin N, von der Weid J P, et al. Experimental and theoretical investigations of coherent OFDR with semiconductor laser sources[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1622-1630.
- [7] Cranch G A, Nash P J, Kirkendall C K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 19-30.
- [8] Bao X, Dhillwayo J, Heron N, et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1340-1348.
- [9] Zhou H B, Liu J Y, Lai J Z, et al. Development status of fiber-optic gyroscopes[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(6): 1-3.
周海波, 刘建业, 赖际舟, 等. 光纤陀螺仪的发展现状[J]. *传感器技术*, 2005, 24(6): 1-3.
- [10] Tan X Y. The Development, key technology and application prospect of military fiber optic gyroscope[J]. *Modern Defence Technology*, 1998(4): 56-62.
谭显裕. 军用光纤陀螺的发展、关键技术和应用前景[J]. *现代防御技术*, 1998(4): 56-62.
- [11] Gu Y H, Dai J Z, Dai Z Y. Development and application of optical frequency domain reflectometer with high resolution[J]. *Infrared*, 2009, 30(4): 30-40.
顾一弘, 戴基智, 代志勇. 高分辨率光频域反射计的发展和应用[J]. *红外*, 2009, 30(4): 30-40.
- [12] Liu S Z, Zhang W, Yu J X. Photoacoustic spectrometer based on the combination of tunable erbium doped fiber laser and erbium doped fiber amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(4): 964-967.
刘善峰, 张望, 于靖旭. 基于可调谐掺铒光纤激光器和掺铒光纤放大器的光声光谱气体分析仪[J]. *中国激光*, 2009, 36(4): 964-967.
- [13] Peng Y. Tunable fiber laser based photoacoustic spectroscopy technology for trace gas detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
彭勇. 基于可调谐光纤激光器的痕量气体光声光谱检测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [14] Jackson D A, Lobo R A B, Reekie L, et al. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(14): 1192-1194.
- [15] Zhao C L, Xiao L M, Ju J, et al. Strain and temperature characteristics of a long-period grating written in a photonic crystal fiber and its application as a temperature-insensitive strain sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(2): 220-227.
- [16] Zhang W D, Wei K Y, Huang L G, et al. Optical vortex generation

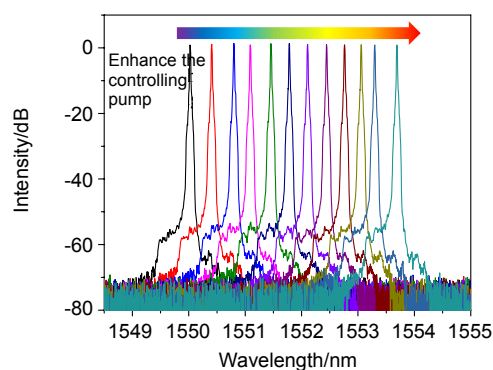
- with wavelength tunability based on an acoustically-induced fiber grating[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(17): 19278–19285.
- [17] Hong K S, Park H C, Kim B Y, *et al.* 1000 nm tunable acousto-optic filter based on photonic crystal fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(3): 031110.
- [18] Albert J, Shao L Y, Caucheteur C. Tilted fiber bragg grating sensors[J]. *Laser & Photonics Review*, 2013, **7**(1): 83–108.
- [19] Cliche J F, Allard M, Têtu M. Ultra-narrow linewidth and high frequency stability laser sources[C]//*Proceedings of the Coherent Optical Technologies and Applications*, 2006.
- [20] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, *et al.* A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. *Nature Photonics*, 2011, **6**(10): 687–692.
- [21] Peng Y. A compact narrow-linewidth laser with a low-Q monolithic cavity[J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(10): 105809.
- [22] Bernhardt E H, van Wolferen H A G M, Agazzi L, *et al.* Ultra-narrow-linewidth, single-frequency distributed feedback waveguide laser in Al₂O₃:Er³⁺ on silicon[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(14): 2394–2396.
- [23] Liang W, Ilchenko V S, Savchenkov A A, *et al.* Whispering-gallery-mode-resonator-based ultranarrow linewidth external-cavity semiconductor laser[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(16): 2822–2824.
- [24] Huang S H, Zhu T, Liu M, *et al.* Precise measurement of ultra-narrow laser linewidths using the strong coherent envelope[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 41988.
- [25] Spiegelberg C, Geng J H, Hu Y D, *et al.* Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(1): 57–62.
- [26] Shen Y H, Qiu Y Q, Wu B, *et al.* Short cavity single frequency fiber laser for in-situ sensing applications over a wide temperature range[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 363–370.
- [27] Xu S H, Yang Z M, Liu T, *et al.* An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(2): 1249–1254.
- [28] Mo S P, Huang X, Xu S H, *et al.* 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(20): 5818–5821.
- [29] Yang F, Ye Q, Pan Z Q, *et al.* 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(2): 149–152.
- [30] Chen M, Meng Z, Tu X B, *et al.* Low-noise, single-frequency, single-polarization Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(12): 2041–2043.
- [31] Chen M, Meng Z, Zhang Y C, *et al.* Ultranarrow-linewidth Brillouin/erbium fiber laser based on 45-cm erbium-doped fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 1500606.
- [32] Zhu T, Bao X Y, Chen L, *et al.* Experimental study on stimulated Rayleigh scattering in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 22958–22963.
- [33] Zhu T, Bao X Y, Chen L. A self-gain random distributed feedback fiber laser based on stimulated Rayleigh scattering[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1371–1374.
- [34] Zhu T, Chen F Y, Huang S H, *et al.* An ultra-narrow linewidth fiber laser based on Rayleigh backscattering in a tapered optical fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**(5): 055110.
- [35] Zhu T, Huang S H, Shi L L, *et al.* Rayleigh backscattering: a method to highly compress laser linewidth[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(33): 4631–4636.
- [36] Yin G L, Saxena B, Bao X Y. Tunable Er-doped fiber ring laser with single longitudinal mode operation based on Rayleigh backscattering in single mode fiber[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(27): 25981–25989.
- [37] Pang M, Xie S R, Bao X Y, *et al.* Rayleigh scattering-assisted narrow linewidth Brillouin lasing in cascaded fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3129–3131.
- [38] Saxena B, Bao X Y, Chen L. Suppression of thermal frequency noise in erbium-doped fiber random lasers[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(4): 1038–1041.
- [39] Mears R J, Reekie L, Poole S B, *et al.* Low-threshold tunable CW and Q-switched fiber laser operating at 1.55 μm[J]. *Electronic Letters*, 1986, **22**(3): 159–160.
- [40] Iwatsuki K, Okamura H, Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fibre ring-laser with 1.4 kHz linewidth[J]. *Electronics Letters*, 1990, **26**(24): 2033–2035.
- [41] Maeda M W, Patel J S, Smith D A, *et al.* An electronically tunable fiber laser with a liquid-crystal etalon filter as the wavelength-tuning element[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, **2**(11): 787–789.
- [42] Smith D A, Maeda M W, Johnson J J, *et al.* Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(6): 387–389.
- [43] Zyskind J L, Sulhoff J W, Sun Y, *et al.* Singlemode diode-pumped tunable erbium-doped fibre laser with linewidth less than 5.5 kHz[J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(23): 2148–2149.
- [44] Lin G R, Chang J Y, Liao Y S, *et al.* L-band erbium-doped fiber laser with coupling-ratio controlled wavelength tunability[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(21): 9743–9749.
- [45] Zhang A Q, Feng X H, Wan M G, *et al.* Tunable single frequency fiber laser based on FP-LD injection locking[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10): 12874–12880.
- [46] Zhu T, Bao X Y, Chen L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(12): 1802–1807.
- [47] Zhu T, Zhang B M, Shi L L, *et al.* Tunable dual-wavelength fiber laser with ultra-narrow linewidth based on Rayleigh backscattering[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): 1324–1330.
- [48] Li Y J, Gao L, Zhu T, *et al.* Graphene-assisted all-fiber optical-controllable laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, **24**(3): 0901709.
- [49] Ye J, Cundiff S T. *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Applications*[M]. Norwell: Springer, 2004.
- [50] Ai-Taiy H, Wenzel N, Preußler S, *et al.* Ultra-narrow linewidth, stable and tunable laser source for optical communication systems and spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(20): 5826–5829.
- [51] Wang L, Cao Y, Wan M, *et al.* Tunable single-frequency fiber laser based on the spectral narrowing effect in a nonlinear semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 29705–29713.
- [52] Li Z, Alam S U, Jung Y, *et al.* All-fiber, ultra-wide band tunable laser at 2 μm[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(22): 4739–4742.
- [53] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135–1184.
- [54] Kumar V V R K, George A K, Reeves W H, *et al.* Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(25): 1520–1525.
- [55] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**: 306–310.

Laser sources for optical fiber sensing

Iroegbu Paul Ikechukwu¹, Huang Shihong¹, Li Yujia¹, Li Fuhui¹, Huang Ligang¹, Gao Lei¹,
Bai Yongzhong², Qu Dingrong², Qiu Feng², Huang Xianbin², Zhu Tao^{1*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems (Education Ministry of China),
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, SINOPEC Research Institute of
Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266000, China



Output spectra at output 2 with the enhancement of the controlling pump

Overview: Optical fiber sensing system depends closely on the quality of the laser source employed, because laser parameters such as the power stability, linewidth and phase noise, have a great impact on the performance of the fiber sensing system in such parameters as the maximum measuring distance, precision, sensitivity and noise characteristics which finds tremendous applications to areas to name a few; distributed oil pipeline monitoring, high resolution sensing, low noise microwave generation, optical atomic clocks, optical precision metrology, high resolution spectroscopy, microwave photonics and laser radars etc. In order to improve the measurement range, noise characteristics, sensitivity and precision of optical fiber sensing system, we need to obtain a narrow linewidth laser light source with a longer coherent length (characterized by laser linewidth), phase noise (characterizing laser frequency stability) and low intensity noise (characterizing laser power stability). In the light of all this, a great deal of attention over the years has been witnessed in academia and industry in regards to the related high-quality laser source employed for fiber sensing system to name a few; long distance super high resolution distributed oil pipeline monitoring system whose predominant distributed optical fiber sensing technology such as OFDR (optical frequency domain reflectometry) technique is greatly dependent of the laser source linewidth for better sensitivity, range and other key factors to its applications, in optical fiber hydrophone system the linewidth of the laser source employed very much determines the system noise and minimum measurable signal of the system, the use of FBG (fiber Bragg grating) to build up a sensor network operating under the technique of either spectral analysis or tunable filter matching method for demodulation purposes greatly depends on high stable power of the laser source employed for simultaneous demodulation of multiple FBG in a sensor network due to its insertion loss and bandwidth. In this article, a brief review on the development trend of the laser source for fiber sensing is presented which firstly emphasizes on narrow linewidth lasers followed by tunable laser and lastly white laser source. Finally, the main limiting factors and kernel technology of laser source for the optical fiber sensing are summarized. In order to achieve high performance of optical fiber sensing, the availability of the ideal ultra-narrow-linewidth and ultra-stable laser, which could be tuned at a desired wavelength span and tuning rate, will be definitely one of the main research directions of the future optical fiber sensing.

Citation: Ikechukwu I P, Huang S H, Li Y J, *et al.* Laser sources for optical fiber sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170684

Supported by the Key Research and Development Program of Ministry of Science and Technology (2016YFC0801202), the Project of Natural Science Foundation of China (61635004, 61377066, and 61705024), the Science Fund for Distinguished Young Scholars of Chongqing (CSTC2014JCYJJQ40002), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJZRPY0005)

* E-mail: zhutao@cqu.edu.cn