



基于智能算法的光子器件研究展望

Research Prospect of Photonic Devices Based on Intelligent Algorithm

摘要: 人工智能与光子学相结合成为光学领域的新热点。遗传算法、机器学习、时间拉伸等技术被陆续应用到非线性光学领域。简要回顾了近年来出现的智能光子器件的研究及发展, 结合发展现状对该领域的未来做了初步展望。认为智能光子器件的研究在进一步拓宽和加深相关领域研究的同时, 可为相关光学器件及系统智能化和产业化奠定基础。

关键词: 光纤激光器; 超快光学; 激光锁模技术; 智能算法

Abstract: The combination of artificial intelligence and photonics has become a new hotspot in the field of optics. Genetic algorithm, machine learning, and time stretch have been applied to the field of nonlinear optics. The research development of intelligent photon devices in recent years is briefly reviewed, and a preliminary outlook on the future of this field based on the development status is made. The research of intelligent photonic devices will further broaden and deepen the research of related fields, laying a foundation for the intelligence and industrialization of related optical devices and systems.

Keywords: fiber laser; ultrafast optics; mode locking technique; intelligent algorithm

宋宇锋 / SONG Yufeng
张晗 / ZHANG Han

(深圳大学, 中国 深圳 518060)
(Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202006013
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.TN.20200416.1011.003.html>

网络出版日期: 2020-04-16
收稿日期: 2020-02-25

激光是 20 世纪最重要的科学发明之一, 它的出现极大地推动了科学技术的发展。以掺杂稀土元素的光纤作为增益介质的光纤激光器, 由于其在光通信、光数据存储、传感技术、医学等领域的广泛应用, 近年来发展十分迅速。脉冲形式的光纤激光器可保证良好的光束质量, 在较低的平均输出功率下获得极高的重复频率和峰值功率, 同时还具有极好的柔性、与灵活性、可设计高可靠性、易于系统集成等优点。由于在未来高速光通信领域具有重要应用价值, 超短脉冲光纤激光器已成为目前激光技术领域最具活力的研究对象。

随着人工智能等技术的蓬勃发展, 智能化成为近年来各行各业发展的一个趋势。人工智能技术的广泛应用为各行各业带来了前所未有的发展

机遇。人工智能技术正在不断渗透到人类的生产生活各个领域。人类的生产生活方式也将因此发生深刻改变。激光制造作为高端制造产业的重要分支, 具有柔性、绿色、高速、高精度等特点。这些先天“基因”优势非常适合与信息化、互联网、人工智能相结合, 因此, 对于高端制造行业的激光产业来说, 智能化也将成为必然趋势。经过多年发展, 通信与光电子行业的融合正在显示巨大的产业前景。可以预见, 智能光电子及智能光通信领域将是未来光电子产业的重点发展方向。

1 智能光子器件研究简介

最近 10 年来, 人工智能技术快速发展, 以算法为基础的人工智能技术正在广泛应用到各行各业。算法是

用来解决一个具有良好规格说明的计算问题的工具。随着科技的发展, 计算机软硬件技术不断更新, 越来越多规模大且复杂程度高的工程和经济问题迫使研究者们研发更多的算法以进一步提高效率、节约资源。模拟自然现象和人类智慧的智能优化算法近年来逐渐成为研究热点。按照智能优化算法解决问题的方式划分, 已经开发出的算法有模拟退火算法、神经网络算法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等, 这些算法有各自的适用域和局限性。随着人工智能技术的快速发展, 智能算法将在越来越多的场景中发挥独特作用。

智能光子器件是将智能算法等数学工具应用到光学领域并实现某种特定功能的器件。伴随着人工智能技术的发展, 智能光子器件近年来开始吸

引来越来越多研究者的注意。

2 智能光子器件研究进展

根据功能划分,智能光子器件包括智能激光器、智能通信器件、智能光传感器等。目前已经被研究者们重点研究并取得重要成果的是智能锁模光纤激光器。

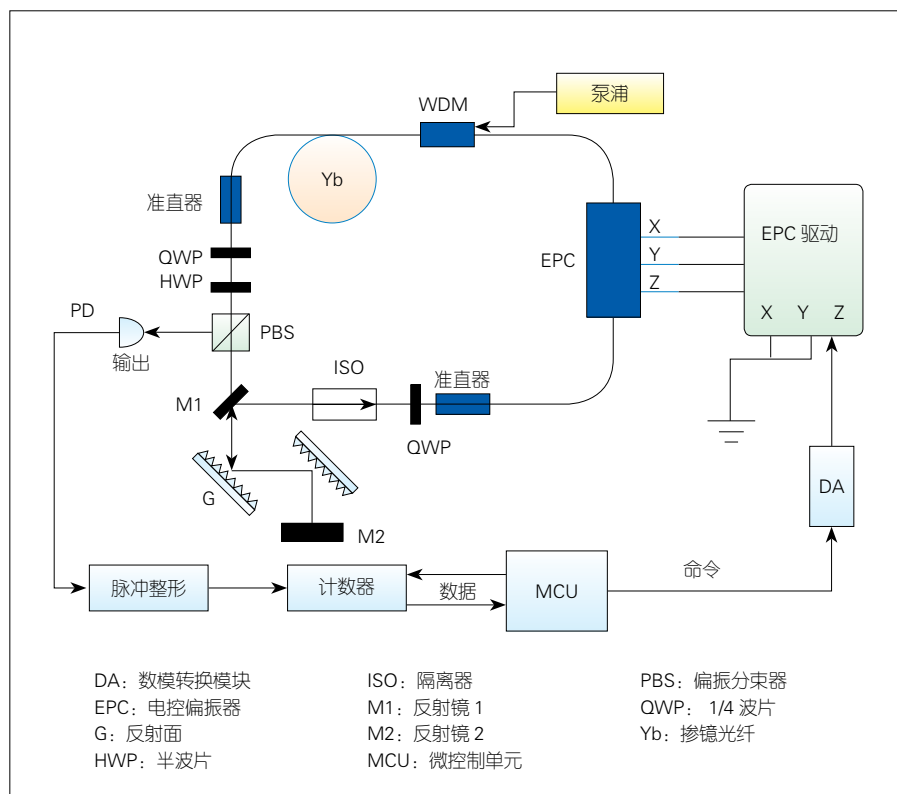
锁模激光技术是在激光器内不同振荡纵模之间实现位相锁定,最终获得规则序列的超短脉冲的技术。光纤激光器中产生超短脉冲的主要方式是被动锁模技术。被动锁模技术通过引入可饱和吸收的机制来实现激光锁模。根据机制引入的方式,被动锁模激光器中的可饱和吸收体主要包括真实可饱和吸收体和人工可饱和吸收体两类。真实可饱和吸收体是指在激光腔内插入具有可饱和性质的材料器件实现锁模。目前在近红外波段比较成熟的是半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[1]。由于其稳定性较好的特点,SESAM 锁模激光器是目前主流的商用锁模激光器。然而,SESAM 波长响应范围比较窄,无法适用于宽波段的激光锁模。尤其是对于 2 μm 及以上的波段,由于缺乏稳定可靠的可饱和吸收体,锁模光纤激光器的发展一直相对滞后。

人工可饱和吸收体包括非线性偏振旋转 (NPR)^[2]、非线性光纤环形镜^[3]等。在非线形偏振旋转被动锁模的情况下,当具有任意偏振的光入射到装置中时,由于光纤前起振器的作用,入射光的偏振态将被转换成线偏振。当入射光在光纤中传播时,由于单模光纤双折射的存在,光的偏振在一定长度的传播后将变成椭圆偏振。在光强较弱的情况下,随着光纤长度的增加,光的偏振将在每一拍长内旋转。然而,如果光的强度较大,在光克尔效应 (即光纤的自相位调制) 的作用下,非线性相移会被引入,从而

导致光的偏振发生改变。此外,光通过起偏器的传输也取决于光的强度。若偏振控制器和偏振器的方向设置得当,光越强,通过分析仪的光强传输就越大,由此将形成可饱和吸收效应,最终产生锁模脉冲。值得注意的是,在非线形偏振旋转锁模光纤激光器中,偏振相关元件必须插入激光器腔中。腔中存在偏振敏感元件时将固定光在空腔位置的偏振态,因此,在非线形偏振旋转锁模光纤激光器中形成的孤子表现为标量孤子特性。1992年, MATASA V. J. 等首次通过非线性偏振旋转锁模技术实现输出脉宽 1.55 ps 的全光纤激光器^[4]。2007年, TANG D. Y. 等对非线性偏振旋转锁模激光腔内进行非线性管理,得到 38.8 MHz 重复频率、47 fs 脉宽的输出脉冲光^[5]。然而,基于非线性偏振旋转效应的被动锁模光纤激光器具有偏振敏感性且不够稳定,这大大限制了其在科学研究和工

业生产中的应用。

目前,现有报道的智能锁模光纤激光技术主要针对基于非线性偏振旋转的锁模技术的缺点,即为了解决非线性偏振旋转锁模存在的不稳定等问题而发展出来的改进技术。智能激光锁模技术也开始兴起,并且取得了不错的研究成果。2010年,德国明斯特大学 HELLWIG T. 等通过在激光器腔内加入模块结构化的压电式挤压器作为自动偏振控制器件,并使用全光纤振幅分割偏振计测量腔内的偏振态,得到了基于非线性偏振旋转效应的锁模特征分布图^[6],为自动锁模的发展奠定了良好的基础。2012年,华东师范大学曾和平教授团队利用遍历和脉冲计数的方法,结合电控偏振控制器 (EPC),实现了初步的自动锁模^[7]。该实验装置如图 1 所示,其中偏振分束器 (PBS) 作为输出耦合器将谐振腔中的部分光输出到腔外进行检测。光



▲图 1 基于非线性偏振旋转锁模自动控制实验装置图^[7]

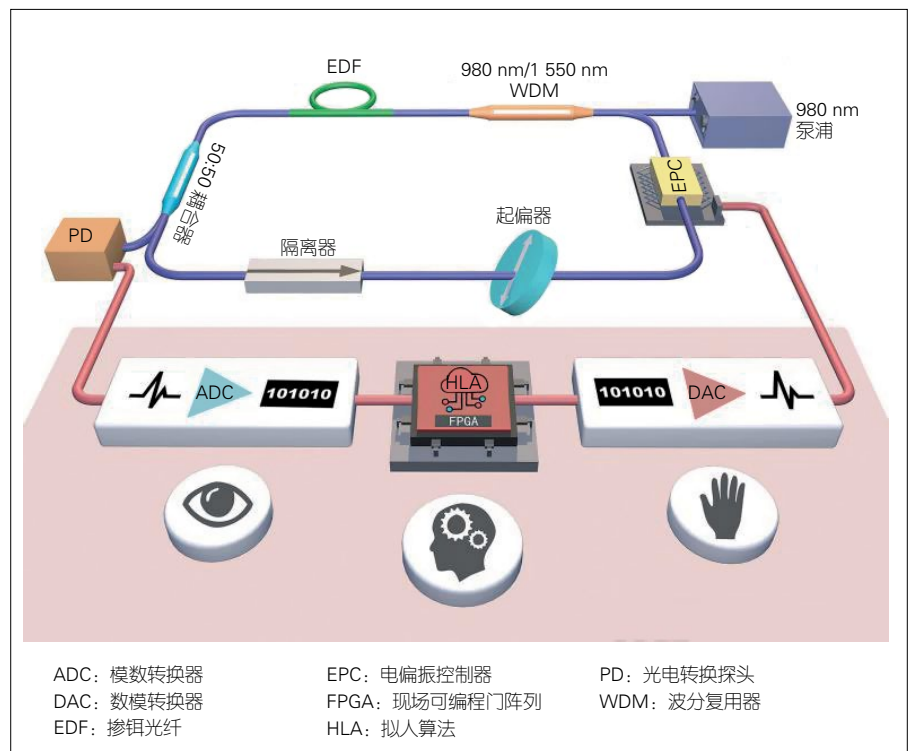
电探测器 (PD) 获得的电信号之后进入脉冲整形模块变成数字信号。该装置用一个高速计数模块进行脉冲计数, 然后将计数结果传递给微控制单元 (MCU)。MCU 根据计数的结果来判定当前是否为锁模状态, 并改变 EPC 的控制电压, 直至找到锁模状态为止。为实现脉冲的高信噪比, 可通过调节 2 个腔内衍射光栅之间的距离, 将光纤激光器腔内的色散优化接近为零, 并通过调整腔内的 3 个波片来微调腔内的偏振态。该实验装置还能精调锁模状态的光谱形状、脉冲宽度和载波包络偏置频率。在光路不变的情况下, 可通过 MCU 设置精确的电压值, 来驱动 EPC 直接复现锁模状态。

2014 年, 中国科学技术大学李莎等利用 MSP430 型单片机、电磁铁偏振控制器以及数模转换器等器件实现光纤激光器自动锁模^[8]。他们同样采用整形电路来获取数字信号并在 MCU 中进行数据处理, 在 MCU 上运行以脉冲计数为核心的快速鉴别算法来反馈控制偏振控制器, 最后达到锁模状态。该锁模激光器通过持续监测输出信号, 实现失锁恢复功能, 具备一定的抗环境干扰能力。此外, 锁模时 MCU 输出的参数可以被保存在带电可擦可编程只读存储器中, 这样系统下次工作时可以立刻进入锁模状态。该实验得到了重复频率为 6.238 MHz 的自动锁模脉冲, 并且锁模启动时间小于 90 s。基于此结构实现的自动锁模在后续改进算法和提高系统工作频率后可以将锁模时间降低到 20 s 以内。同年, 美国华盛顿大学西雅图分校 KUTZ J. N. 教授团队首次将机器学习应用到自动锁模, 并提出“自调谐光纤激光器”的概念^[9]。自适应控制的机器学习策略, 能够产生有效的自调谐锁模算法。其中, 基于多参数的极值寻找控制算法的自适应控制器能够在锁模激光器中

获得并保持高功率单脉冲状态, 而且机器学习算法能够学习谐振腔的特征, 并进行快速的状态识别来改善性能。该实验中的目标函数将输出功率除以脉冲频谱的四阶中心距, 从而使得总能量与锁模方案的时间保持平衡。2015 年, 法国勃艮第大学的 ANDRAL U. 等首次提出利用演化算法, 结合电动偏振控制器实现自动锁模^[10]。该演化算法模仿生物进化过程来优化给定的控制目标, 并且算法能够在 12 代之内收敛, 即 12 代之内可以找到目标脉冲状态, 这对应着 30 min 的算法运行时间。该实验中的收敛时间主要受限于 EPC 的热响应时间, 所以使用更快的 EPC 可以大大减少算法收敛的时间。此外, 该实验不仅实现了基频锁模, 还实现了不稳定的调 Q 锁模。2016 年, 英国帝国理工学院 WOODWARD R. I. 等^[11]通过使用遗传算法对腔内的偏振态进行优化实现了自动锁模。2017 年, 美国科罗拉多大学的 WINTERS D.

G. 等利用遗传算法实现全正常色散光纤激光器的自动锁模, 同时利用爬山算法进行失锁恢复^[12]。在这些自动锁模相关的研究中, 自动锁模往往需要耗时约 30 min。其中, 已经实现的最短锁模时间为 90 s, 最短的失锁恢复时间为 30 s。

最近, 上海交通大学义理林教授课题组开发了基于拟人算法的智能锁模激光器, 如图 2 所示。该装置利用模数转换器 (ADC)、现场可编程门阵列 (FPGA) 和模数转换器 (DAC) 组成实时反馈控制电路。结合拟人算法和实时反馈控制电路, 该智能锁模光纤激光器可以自动锁定至基频锁模、谐波锁模、调 Q 和调 Q 锁模等多种脉冲状态。此外, 该智能锁模光纤激光器大幅刷新自动锁模和失锁恢复的耗时记录。实验中最快自动锁模仅耗时 0.22 s, 最快失锁恢复仅耗时 14.8 ms^[13]。之后该课题组又结合时间拉伸技术, 利用实时光谱对智能锁模激光器做了



▲图 2 基于拟人算法的智能锁模光纤激光器装置示意图^[13]

进一步研究^[14]。

值得注意的是,目前智能激光器的研究报道仅限于利用非线性偏振旋转锁模的光纤激光器,该领域的研究刚刚起步,尚有很大的发展空间。

3 智能光子器件研究展望

本节中,我们将介绍智能光子器件的未来研究发展方向。

3.1 基于实时光谱探测的智能光子器件

最新研究表明,智能锁模技术与时间拉伸色散傅里叶变换技术相结合。时间拉伸色散傅里叶变换,又称时间拉伸变换或时域傅里叶变换,是一种光谱学技术。其基本思想是利用光学色散来区分不同波长的光,进而实现实时分析光谱的目标。该技术被最早提出应用于模数转换,以克服模数转换的速度及分辨率限制,其后又被应用到实时光谱仪、实时成像、光学怪波、高速显微镜、受激拉曼光谱仪等。如果把时间拉伸色散傅里叶变换技术所测的实时光谱数据融入智能算法中,将有望大幅提高算法的准确度,进而可缩减激光器锁模启动时间,快速找到目标状态进行研究。时间拉伸色散傅里叶变换技术还可以对智能锁模的启动过程实时监控,快速排查系统故障,便于改进及优化算法等。将智能锁模技术与时间拉伸色散傅里叶变换技术同时运用到光纤激光器锁模,有望解决锁模激光稳定性不高的问题。深入研究激光器的锁模脉冲动力学特性,有助于加深对光纤激光器特性的理解和认识。

3.2 基于二维材料的中红外智能光子器件

近年来,中红外波段光纤激光器已成为领域内新的研究方向。中红外波段的激光在激光通信、激光雷达、

环境监测、医疗、工业加工、激光武器对抗等领域中有着极其重要的应用。比如,2 μm 中红外波段激光对水吸收强烈,因此可在医学上用于激光微治疗和组织切除手术。传统的塑料材料对于紫外到近红外的激光几乎没有吸收,而2 μm 波段激光正好位于大部分聚合物的吸收带,因此,2 μm 激光可用于聚合物材料的切割焊接等。中红外波段位于大气吸收窗口。位于中红外波段的脉冲激光可用于激光测距、远程遥感、无线通信等方面。大部分军用探测传感器的响应波长都位于中红外波段,峰值功率高的中红外超短脉冲激光用于红外干扰。中红外激光的广阔应用前景以及中红外激光器极具活力的市场,在近年来引起学术界和工业界的广泛关注。大力发展中红外激光已经成为激光领域的新趋势。现有的中红外激光产生的方式包括半导体激光器、光学倍频激光器、过渡金属元素掺杂 II-VI 族化合物激光器、光纤激光器等。而较为常见的在2 μm 波段产生超短脉冲的激光源,主要有掺铊激光器、铊钽共掺激光器、基于拉曼频移的掺铟光纤激光器等。

相比于近红外锁模激光器,由于缺乏该波段的可饱和吸收体,2 μm 的中红外锁模激光发展相对滞后。2014年,黑磷作为厚度相关的直接带隙材料被发现,它具有实现新型光电器件的应用潜力,特别适合用于2 μm 中红外波长锁模光纤激光器的研究。江苏师范大学、上海交通大学、国防科技大学、波兰华沙理工大学等均对基于黑磷锁模的中红外激光器进行了相关报道。虽然黑磷材料的出现有效地解决了中红外波段可饱和吸收体器件缺乏的问题,但是目前黑磷在2 μm 波段的超短脉冲研究还处于早期阶段。由于缺乏黑磷锁模的中红外光纤激光器的系统性研究,人们对谐振腔脉冲产

生机制缺乏足够认识,仍然存在无法自启动、脉冲质量不高、无法满足高功率激光需求等问题。针对中红外超短脉冲的应用需求及传统锁模技术难以适用于中红外波段的局限,智能算法可以被进一步用于研究中红外波段被动锁模脉冲的产生机理及其特性,和研发中红外波段的智能锁模激光器。同时针对黑磷等二维材料制备工艺尚不完全成熟的现状,智能算法可对材料品质进行快速测试,同时反馈出符合要求的材料,以加快二维材料相关的光电应用及发展。

3.3 智能光学频率梳

光学频率梳由等距线组成,而频谱是由一系列均匀间隔且具有相干稳定相位关系的频率分量组成的光谱。光学频率梳光源的发展仍然是一个相对年轻的研究领域。近年来,光频梳的应用逐渐增多,如精密激光光谱和频率计量遥测、光学波形、微波合成、超高数据速率传输、微波滤波、太赫波产生等。目前已经有多个产生光频梳的方法,基于微谐振器的光频梳生成、垂直外腔表面发射激光器和锁模光纤激光器。

光频梳对输出频率梳齿的稳定性有很高要求,这对于锁模光纤激光器的脉冲稳定性是个很大的挑战。而基于智能锁模的孤子光纤激光器,有望解决这一问题。如前所述,可编程的智能锁模光纤激光器具有自动恢复的功能,可对脉冲抖动情况进行实时监控,这对于提高脉冲的稳定性具有重大意义。2015年,美国 KUTZ J. N. 等介绍了利用机器学习的方法稳定锁模激光器及频率梳的方法^[15]。他们将近年出现的数据驱动的方法结合起来,构建一种能够在锁模激光器中实现自校正和接近最优性能算法。该算法结构既有学习模块,也有执行模块。

该算法实现了光学频率梳的自调谐。这一探索为未来智能光频率梳的发展提供了重要参考。

3.4 其他智能光子器件

可以预见的是,智能光子器件的研究并不局限于上述介绍的部分,例如全光通信、光传感等应用场景对智能化同样具有较高的需求。结合目前的发展状况,研究者们有望在未来开发出智能波长转换器、智能光开关、智能光纤传感器、智能光滤波器等一批新型光学器件。

4 结束语

本文中,我们简要回顾了智能光子器件的相关研究,重点梳理了将传统超短脉冲光纤激光器优化改进成输出特性可编程的智能锁模激光器的相关研究进展,同时对该领域的未来发展做了一些展望,包括中红外光纤激光器、光学频率梳、光纤通信器件等相关领域,为未来光子技术智能化和产业化提供重要参考。

参考文献

- [1] KELLER U, WEINGARTEN K J, KARTNER F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 1996, 2(3): 435-453. DOI:10.1109/2944.571743
- [2] MATSAS V J, NEWSON T P, RICHARDSON D J, et al. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. Electronics letters, 1992, 28(15): 1391. DOI:10.1049/el:19920885
- [3] WU S, MORSE T F, STRAIT J, et al. High-power passively mode-locked Er-doped fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. Optics letters, 1993, 18(17): 1444. DOI:10.1364/ol.18.001444
- [4] POOLE S B, PAYNE D N, FERMAN M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions [J]. Electronics letters, 1985, 21(17): 737-738. DOI:10.1049/el:19850520
- [5] TANG D Y, ZHAO L M. Generation of 47 fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser [J]. Optics letters, 2007, 32(1): 41-43. DOI:10.1364/ol.32.000041
- [6] HELLWIG T, WALBAUM T, GROB P, et al. Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation [J]. Applied physics B, 2010, 101(3): 565-570. DOI:10.1007/s00340-010-4224-2
- [7] SHEN X L, LI W X, YAN M, et al. Electronic control of nonlinear-polarization-rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers [J]. Optics letters, 2012, 37(16): 3426-3428. DOI:10.1364/ol.37.003426
- [8] LI S, XU J, CHEN G, et al. An automatic mode-locked system for passively mode-locked fiber laser[C]//2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing. Beijing, China: International Society for Optics and Photonics, 2013
- [9] BRUNTON S L, FU X, KUTZ J N. Self-tuning fiber lasers [J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2014, 20(5): 464-471. DOI:10.1109/jstqe.2014.2336538
- [10] ANDRAL U, SI FODIL R, AMRANI F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm [J]. Optica, 2015, 2(4): 275-278. DOI:10.1364/optica.2.000275
- [11] WOODWARD R I, KELLEHER E J R. Towards 'smart lasers': self-optimisation of an ultra-fast pulse source using a genetic algorithm [J]. Scientific reports, 2016, 6: 37616. DOI:10.1038/srep37616
- [12] WINTERS D G, KIRCHNER M S, BACKUS S J, et al. Electronic initiation and optimization of nonlinear polarization evolution mode-locking in a fiber laser [J]. Optics express, 2017, 25(26): 33216-33225. DOI:10.1364/oe.25.033216
- [13] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm [J]. Optica, 2019, 6(3): 362-369. DOI:10.1364/optica.6.000362
- [14] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis [J]. Light: science & applications, 2020, 9: 13. DOI:10.1038/s41377-020-0251-x
- [15] KUTZ J N, BRUNTON S L. Intelligent systems for stabilizing mode-locked lasers and frequency combs: machine learning and equation-free control paradigms for self-tuning optics [J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): 459-471. DOI:10.1515/nanoph-2015-0024

作者简介



宋宇锋, 深圳大学助理教授; 主要研究领域为非线性光纤光学及全光信号处理; 已发表论文 50 余篇, 总被引用超过 1 400 次, H 因子 21。



张强, 深圳大学特聘教授、博士生导师, 深圳市黑磷工程实验室主任, 美国光学学会会士, 首届基金委“优青”, 国家“青年人才”, 高被引科学家, 广东省领军人才; 长期致力于信息功能器件带宽、动态调控、响应速度等性能优化, 研制出面向

国家重大战略需求的高性能新一代光电子材料与器件; 获教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新奖、中国光学十大进展奖、广东省丁颖科技奖、深圳市青年科技奖、深圳市自然科学基金奖等; 在《Physics Reports》《Proceedings of the National Academy of Sciences》等期刊发表论文 200 余篇, 总被引超过 3 万次, H 因子 85。