

片上集成克尔光频梳的波分复用光纤通信技术综述 (特邀)

肖滢兰, 杨艳平, 杨郑宇潇, 胡佳豪, 金丹妮, 耿 勇, 周 恒*

(电子科技大学 光纤传感与通信教研部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 为了应对在传输容量、光谱利用率、能量效率、体积和系统复杂度方面日益增长的需求, 波分复用 (WDM) 光纤通信系统需要比目前使用的传统激光模块更先进的激光源。由集成片上微腔产生的克尔光频梳是下一代波分复用激光源中的一个十分具有前途的方案, 其优势包括宽光谱、大量的梳齿、与波分复用信道相匹配的频率间隔、高度稳定的频率、低的相位噪声、与芯片集成的兼容性以及能够低成本地批量生产。回顾了克尔光频梳的基本原理, 并介绍了各种克尔光频梳器件的制造方法。此外, 还讨论了克尔光频梳的特点, 如高光谱纯度和能够兼容芯片集成以及其能在长距离相干传输和数据中心互连中推动波分复用光通信发展。

关键词: 微腔光频梳; 波分复用; 光纤通信

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220291

Chip-scale Kerr optical frequency comb for wavelength-division multiplexing optical fiber communications (*Invited*)

Xiao Yanlan, Yang Yanping, Yang Zhengyuxiao, Hu Jiahao, Jin Danni, Geng Yong, Zhou Heng*

(Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To cope with the ever-increasing requirements on transmission capacity, spectral utilization, energy efficiency, small volume, and system simplicity, wavelength-division multiplexing (WDM) optical fiber communication systems need more advanced laser sources than those conventional laser modules used today. Kerr optical frequency comb generated in integrated on-chip micro-cavity provides a promising candidate as the next generation WDM laser source, thanks to its advantages including broadband spectrum, large number of comb lines, matched frequency interval with WDM channels, highly stable frequency, low phase noise, compatibility for chip integration, and low-cost volume production. The fundamental physics of Kerr optical frequency comb was reviewed and the fabrication methods of various Kerr optical frequency comb devices were introduced. Moreover, the unique merits of Kerr optical frequency comb were discussed, such as high spectral purity and compatibility for chip integration, which could facilitate WDM optical communication in the scenarios of long-haul coherent transmissions and data center interconnects.

Key words: micro-cavity optical frequency comb; wavelength division multiplexing; optical fiber communications

收稿日期:2022-04-26; 修订日期:2022-05-12

基金项目:国家自然科学基金 (62105240, 62075159); 国家重点研发计划 (2019YFB2203002)

作者简介:肖滢兰,女,硕士生,主要从事集成多波长光源方面的研究。

导师(通讯作者)简介:周恒,男,副教授,博士,主要从事集成光学通信芯片、硅基光子技术、高性能激光器芯片方面的研究。

0 引言

目前,海量互联网流量的传输主要依赖于基于波分复用(WDM)的光纤通信网络^[1],它从跨洋海底电缆到互联网巨头的数据中心互连环节全天候工作。波分复用技术的本质是使用多波长(即频率或波长)激光器并行传输数据信道,从而增加单个光纤的整体传输容量。例如,目前的商业波分复用系统可以在预定义的 C-波段和 L-波段利用超过 100 个频率间隔为 100 GHz 的数据通道,在 1 s 内,100 GB(很快将变为 400 GB 或 800 GB)二进制信息就可以在各个激光场被编码后以光速传输到全球各地。显然,多波长激光源是波分复用系统最重要的组成部分之一,数据信息就被编码到上面。为了实现高质量和可靠通信,作为数据载体的激光器应满足一定的性能指标,包括足够大的功率、灵活选择激光发射波长(完全覆盖 C+L 波段)、小体积和低成本等。此外,现代波分复用系统的主流工作方式采用相干数据调制与接收^[2],为了达到尽可能高的频谱效率,其信息被编码到激光载波的振幅和相位(或同相和正交分量)上,因此,还需要波分复用激光源(载波和本地振荡器)具有高度稳定的频率和低相位噪声(即窄线宽)。目前,商用多分复用系统主要采用半导体集成可调谐激光阵列(ITLA),功率为 10~50 mW,基本线宽为 100~500 kHz,以及实现了在 C+L 波段上的波长可调。虽然 ITLA 模块已经很好地支持了目前的波分复用网络,但是它在应对下一代波分复用系统日益增长的需求上却显得力不从心。首先,每个 ITLA 只提供一个激光载波,因此,需要数十甚至数百个 ITLAs 来提供单个光纤中必要的波分复用激光载波,对尺寸、成本和能耗方面造成不利影响。其次,ITLAs 之间的频率稳定性和相位相干性非常差,考虑到相邻 ITLAs 之间的频率漂移,必须在 WDM 信道之间留出相当大的保护频带,同时也将系统容量降低到香农极限以下。第三,当 ITLAs 用作相干系统中的数据载体和本地振荡器时,其相对较大的线宽(即高的相位噪声)加重了用于实现不断跟踪和补偿载波和本振激光器之间的相位漂移功能的数字信号处理(DSP)电路和算法的相干接收机的负担^[3-4]。

如果有一个单一的装置,它能够大量提供具有超

高的频率稳定性和超低相位噪声的激光,就能解决上述问题。事实上,这种装置早就已经存在了,它被称为光频梳(OFC),并且在 2005 年获得了诺贝尔奖^[5]。虽然光频梳已经在频率合成、精密计时、激光光谱学和计量学等领域起到了革命性的影响,但迄今为止,其尚未在波分复用网络中实际应用,主要原因是:传统的光频梳设备主要基于飞秒锁模脉冲激光器,其梳齿间距(即相邻梳状线之间的频率间隔)通常为 50 MHz~1.0 GHz,远小于波分复用信道定义间隔(即 12.5~100 GHz)。此外,锁模激光光频梳与几十或几百个 ITLAs 相比都显得更加笨重和昂贵,让它的优势不复存在。

近年来,克尔光频梳(Kerr Frequency Comb, KFC)的出现以及其独特而优秀的特性,为将光频梳技术引入波分复用光纤通信提供了新的可能^[6]。一般来说,KFC 是通过可以兼容硅光子芯片集成过程的超紧凑光学微腔产生的;KFC 的梳齿间隔可以很好地符合波分复用系统的规定;KFC 频率稳定性和相位噪声性能相当于传统的光频梳,比单独的 ITLAs 好几个数量级。因此,研究人员迫切地期望 KFC 芯片和模块能够完全集成片上光收发机(如图 1 所示)^[7],并在不太遥远的未来应用于各种波分复用网络(主干网、城域网和接入网)。文中回顾了 KFC 技术的基本原理,并总结了它的最新进展。还讨论了 KFC 技术在长距离相干传输和数据中心互连中的优点,它是否以及如何推动波分复用通信发展的。

1 克尔光频梳基础

1.1 克尔光频梳发展的历程

从历史的角度来看,KFC 发展的过程已经经历了三个主要阶段。在早期,KFC 的形成是基于在微腔中的克尔非线性光参量振荡(OPO)和级联的四波混频(FWM)效应^[6]。特别的,当连续波单色激光(下面写作泵浦光)被送入到光学微腔时,如果它的频率被调谐到和腔的其中一个谐振频率对齐时,腔内的激光场就会共振加强,进而与腔的主体材料相互作用,触发三谐振光参量振荡。随后,OPO 边带通过级联 FWM 产生越来越多的边带,直到一定带宽内的所有腔谐振都被 FWM 边带满足。由于 OPO 和 FWM 都是遵循能量和动量守恒定律的参数化过程,生成的边带具有

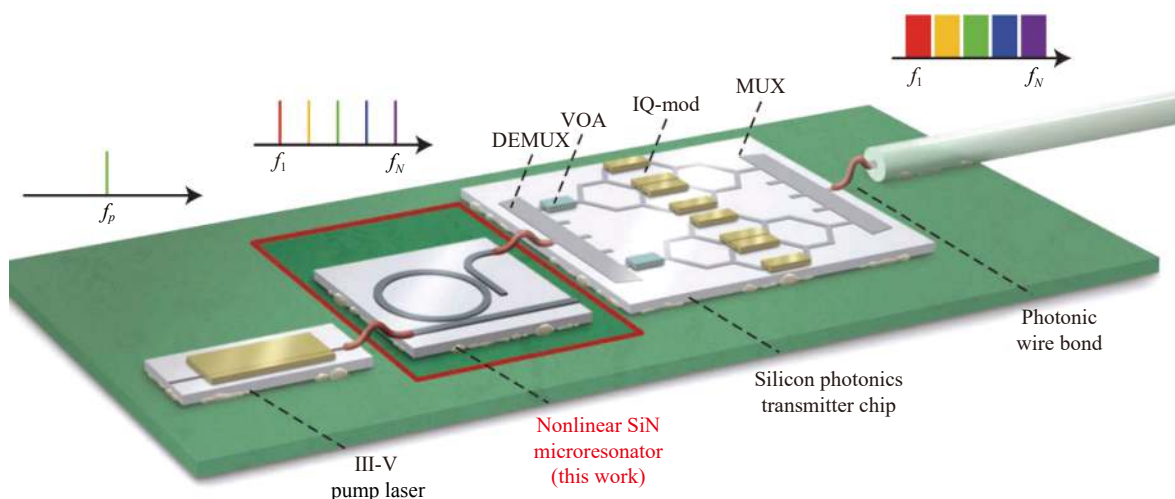


图 1 专家对未来利用克尔光频梳作为波分复用光源的芯片级光发射机的想象^[7]

Fig.1 Artist's view of future chip-scale optical transmitter using Kerr frequency comb as WDM light sources^[7]

足够好的可公度性,可以被识别为克尔光频梳,命名为 KFC。然而,在这个阶段,相互交织的 OPO 和 FWM 工艺并不能保证只有一个边带驻留在某个腔谐振模式内,使得每条梳状线都受到高相对强度噪声 (RIN) 和频率噪声的影响,因此,该阶段 KFC 不具备作为波分来源的能力。

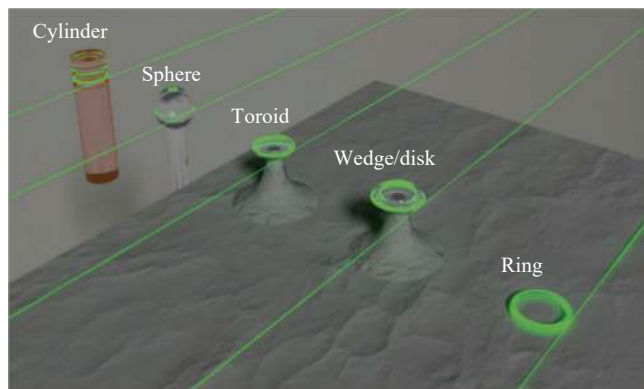
KFC 形成第二阶段机制的标志是在微腔中发现了耗散克尔孤子 (DKS),这是由瑞士洛桑联邦理工大学的 Tobias Kippenberg 教授领导的研究小组出色完成的^[8]。他们展示了通过将泵浦激光频率从腔谐振的较短波长侧快速调谐到较长波长侧,让 OPO 和 FWM 产生的密集梳状线可以自主演变为具有超平滑梳状光谱包络的低噪声状态。他们进一步发现,这种动力学背后的物理原理是时域 DKS 脉冲序列的形成,这是空腔反常色散和克尔非线性相移之间以及腔耗和参数增益之间的双重平衡的结果。或者,当主微腔具有正常色散时,也可以获得锁模并且输出时间图案变为暗孤子脉冲。由于低噪声特性和宽带平滑光谱,孤子态 KFC 立即成为波分复用通信的理想光源。在 2017 年报道的里程碑式实验中,研究人员使用孤子态 KFC 提供 179 个 WDM 激光载波,并实现了 50 Tbit/s 的数据传输^[9]。

最近,在硅基底上实现了泵浦激光器和微腔的混合集成,导致了 KFC 的第三阶段机制^[10]。特别是当泵浦激光器耦合到微腔而没有在其间放置光隔离器时,微腔内的瑞利散射将一小部分泵浦激光能量反射

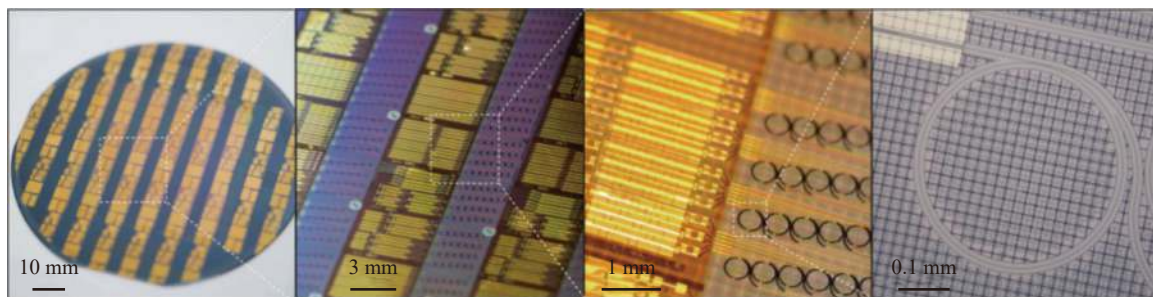
回激光器,并强制激光频率锁定到相应的微腔共振。这个过程被称为激光自注入锁定,它可以引起泵浦激光线宽的显著压缩。此外,已经发现^[10]锁定到腔谐振的泵浦激光自注入也可以显著扩大用于产生孤子的允许泵浦激光频率范围,从而促进基于 DKS 的 KFC 的可靠创建甚至快捷生成。正如下文将要讨论的基于这种机制的 KFC,结合了晶圆级混合集成、自注入锁定和启钥孤子产生的优点,构成了一种前景远大的具有优异性能和适用性的波分复用激光源。

1.2 KFC 设备的制造

基于上述机制, KFC 可以在各种微腔平台中生成,包括回音壁模式 (WGM) 微腔和片上微环谐振器 (MRR)。WGM 微腔通常呈环形、楔形、盘形、圆柱体和球形,如图 2(a) 所示,主体材料包括熔融石英、结晶 MgF_2 、 CaF_2 等^[11]。WGM 微腔的制造过程包括精密加工、金刚石浆料抛光和激光切割。WGM 微腔的关键优点是超高品质因数 (Q -factor),通常可以超过 1×10^9 ,并且能够以相当低的泵浦功率(即 1~10 mW)生成 KFC。然而,将这些 WGM 微腔集成到芯片上并实现高良率生产仍具有很大的挑战。相比之下, MRR 微腔直接在芯片上制作,兼容 CMOS 工艺,常用的主晶圆包括氮化硅、铌酸锂和氮化铝等。MRR 微腔通常比 WGM 微腔具有更小的 Q 因子,但非线性系数更高,并且 MRR 中 KFC 生成的典型泵浦功率为 20~200 mW,取决于具体的设备参数。重要的是,综上所述,现在可以通过混合光子集成将 MRR 微腔和 III-



(a)



(b)

图 2 (a) 不同几何形状的微腔^[11]; (b) 晶圆级异质集成氮化硅 MRR 和 InP 泵浦激光器^[12]

Fig.2 (a) Micro-cavity based on different geometries^[11]; (b) Wafer-scale heterogeneously integrated silicon nitride MRR and InP pump laser^[12]

V 泵浦激光器异质集成在同一硅衬底上, 从而实现 KFC 器件的低成本批量生产, 如图 2(b) 所示^[12]。这种混合集成 KFC 芯片代表了一种有吸引力且可立即适用的 WDM 激光源, 可用于构建集成光学数据收发器。

2 KFC 作为 WDM 光源的适用性

此节概述 KFC 的性能特性是否满足 WDM 通信对多波长光源的需求, 包括频谱带宽、梳状线间距、频率和相位噪声、功率电平和强度噪声。讨论将集中在 KFC 的锁模 DKS 状态 (以下写作孤子状态 KFC), 其低噪声特性和平滑的频谱包络最适合 WDM 系统。此外, 讨论将集中在 KFC 参数是否以及如何有益于 WDM 通信, 还有哪些缺点需要改进。

2.1 光谱带宽

理论上, 孤子态 KFC 的光谱宽度与微腔的 Q 因子、FSR、非线性系数、输入泵浦功率和群速度色散 (GVD) 的倒数成正比^[8]。以 100 GHz FSR 氮化硅 MRR 微腔为例, 产生的孤子态 KFC 通常在大于 150 nm 处具有 20 dB 带宽。如果考虑到这样的 20 dB 范围内的梳状线可以在后续放大阶段进行放大和均衡, 则

100 GHz 间隔的 KFC 可以轻松覆盖整个 C+L 频段, 并在 100 GHz 的基础上提供所有预定义的 WDM 载波。当目标应用需要较小的载波间隔 (例如 12.5/25/50 GHz) 时, 由于其带宽与 FSR 成正比, 使用单个 KFC 生成所有 WDM 载波变得更加困难。然而, 考虑到它们的微型体积, 拼接或交织多个 KFC 以构成更紧密的波分复用载体已被证明是一种可行的解决方案^[9]。

2.2 梳齿间隔

孤子态克尔光梳线的频率间隔取决于微腔的周长和有效折射率。这两个参数可以通过制造合适的微腔几何结构来配置, 而且常规的 WDM 网格 (即 12.5/25/50/100 GHz) 可以通过传统的制造方法实现。值得一提的是, KFC 的频率间隔一旦产生就很难改变, 因此频率的可调谐性可能是 KFC 的缺点。这一问题一个可行解决方案是生成间隔为 12.5 GHz 的 KFC (即 ITU 定义的柔性网格 WDM 槽宽粒度), 并使用片上移频器 (如单边带硅调制器) 和可编程滤波器 (如波长选择开关) 来产生所需的梳齿频率。

2.3 频率噪声

已知环境噪声影响频率噪声的低频段、泵浦激光

的噪声影响频率噪声的低频到中频段、量子极限噪声在偏高频段,而在理想条件下,对于孤子态, KFC 的每条梳状线的相位应该严格地与泵浦光的相位对齐(即孤子脉冲的啁啾应为零)。因此,对于理想条件下孤子态 KFC 的频率噪声来自泵浦激光的频率噪声。KFC 的这一特性导致其在实际应用中最重要优势:可以使用超低频率噪声泵浦激光器,然后产生的所有 KFC 谱线同时具有超低频噪声。此外,如前文所述, KFC 最新的产生机制泵浦激光对微腔的自注入锁定,在此过程中泵浦激光的频率噪声可以得到很大程度的抑制,从而导致 KFC 所有谱线的频率噪声净化。例如,通过利用一个集成线宽为 10 kHz 的超低噪声泵浦激光器, KFC 可以提供数十个甚至数百个具有与泵浦激光器相当线宽的 WDM 载波。例如,通过利用一个基本线宽为 1 kHz、集成线宽为 10 kHz 的超低噪声泵浦激光器, KFC 可以提供数十个甚至数百个具有与泵浦激光器相当线宽的 WDM 载波。换句话说,有着超低噪声属性但是同时有着不可接受的成本与体积的高端激光器现在被用于优化 WDM 系统,因为高端激光器的成本和体积与在微腔中产生的数十个甚至上百个 KFC 载波共享。另一方面,需要注意的是微腔的实际缺陷,如高阶跃阶色散、伴随色散波的产生、不同腔模 Q 因子的变化、拉曼散射引起的谱移和本征热折射噪声等会引起光梳间距的随机波动,并给 KFC 增加额外的频率噪声^[13],使得光梳谱线频率噪声与泵浦激光器的频率噪声并不完全相同。

好消息是,根据目前公布的数据, KFC 随机间隔波动引起的频率噪声可以通过各种光梳锁定技术来控制,并且与传统 ITLA 相比,能够保持更小数量级。对于微腔克尔光梳而言,因色散波和拉曼自频移效应,使得 KFC 重复频率和泵浦激光频率失谐相关。因此,泵浦激光的随机频率波动会导致克尔光梳重复频率的随机抖动,进而劣化克尔光梳梳齿的频率噪声特性。目前,针对这一难点问题,各国研究人员已提出了多种频率锁定技术,包括: Pound-Drever-Hall (PDH) 锁定技术、基于泵浦光调制的注入锁定技术、“quiet-point”技术、超稳参考激光器锁定技术等。例如,瑞士研究人员 Tobias J. Kippenberg 等提出对泵浦激光进行相位或者强度调制,利用光注入锁定原理实现了克尔光梳重复频率与微波信号的锁定,最终实现

克尔光梳重复频率稳定度 4 个数量级的提升^[14-15];又如,美国研究人员 Kerry Vahala 等提出了“quiet-point”技术,该技术利用色散波效应抵消拉曼自频移效应导致的频率噪声,实现克尔光梳频率噪声的抑制^[16]。通过采用上述频率锁定技术,克尔光梳梳齿间拍频相位噪声可以降至 -140 dBc/Hz (在 100 kHz 频偏处),实现远高于 ITLA 阵列的频率稳定性。

2.4 功率等级和强度噪声

在微腔内孤子态 KFC 产生过程中,连续波泵浦激光场向超短孤子脉冲的能量转移被限制在超短的时间窗内,因此只有一小部分泵浦能量可以转化为大量的 KFC 谱线,使得每条梳状线的功率都相当低。再次以 100 GHz FSR 氮化硅 MRR 微腔为例,假设片上泵浦功率为 100 mW,产生的孤子态 KFC 的最大梳状线功率约为 0.1 mW (比泵浦功率低 30 dB),总能量转换效率约为 1%~2% (梳状线总能量与泵浦能量之比)。这种孤子态 KFC 的功率远远低于 ITLA 的典型输出功率 (10~50 mW),并且在大多数应用场景中不足以作为 WDM 激光载波。事实上,低功率水平被认为是 KFC 最突出的缺点,阻碍了它作为高效的 WDM 光源。与此同时,解决这一问题的研究正在进行中。例如,在 CPF2 光模块中的微型掺铒光纤放大器 (EDFA) 可以用于 KFC 模块。此外,根据笔者最近的计算和测量,在低非线性、大模面积、超高品质因子回音壁腔中产生的孤子态 KFC 可能会使 KFC 功率提高 1~2 个数量级。研究与计算发现,绝热地修改失谐与泵浦功率,可以实现归一化泵浦失谐接近于零的低泵浦功率区域。具体来讲,通过改变微腔的泵浦共振,可以在反常色散微腔中产生高效率的 KFC^[17]。另外,在正常色散微腔中带有暗脉冲的锁模 KFC 通常可以提供更高的梳状线功率,但其谱宽和光滑度不如孤子态 KFC。对于集成光波导,可以通过采用多级结构来优化增益和光信噪比,从而实现转换效率较高的光孤子^[18]。例如,清华大学研究人员薛晓晓等提出利用双环级联结构提升克尔光梳转换效率,且理论上最高可实现 100% 的转换效率^[19]。又如,瑞士研究人员 Tobias J. Kippenberg 通过在微环输出端集成掺铒的氮化硅波导,成功实现了光梳谱线的功率提升^[18]。再如, Chalmers 大学 Victor Torres-Company 教授研究小组,通过在用于激发孤子的微环腔上级联一个小的微

环腔,可单独动态控制泵浦激光所在谐振峰的谐振频率,实现了集成氮化硅微环腔中克尔光梳转换效率的提升,转换效率最高可达 50%^[17]。尽管目前还没有一个理想的、即时的解决方案,但可以乐观地认为,在不久的将来,KFC 的功率级别至少可以达到 WDM 应用的标准,即使不是全部可以达到。对于相干光通信而言,对克尔光梳的功率和信噪比都提出了一定的需求,上述克尔光梳功率提升技术均有利于将 KFC 应用到长距离通信与短距离通信中,并且可以为使用更高阶调制、更高速的调制提供技术基础。除此之外,光注入锁定技术是另一个可实现克尔光梳低噪声放大的潜在技术,具备低噪声、输出功率灵活可控、可实现光梳解复用的特点,特别适用于光通信场景。

与上述频率噪声的机理相似,孤子态 KFC 的相对强度噪声主要取决于泵浦激光器的相对强度因子。此外,由于产生的 DKS 脉冲能量敏感地依赖于泵浦腔频率失谐^[8],泵浦激光器的频率噪声也可以转换为 KFC 梳状线的强度噪声。然而,根据公布的数据,KFC 线的 RIN 性能与泵浦激光器一致,在 10 MHz 的偏移量下可以可靠地实现 -140 dBc/Hz^[20]。

3 使用 KFC 推动 WDM 光纤通信

与 ITLA 等传统的 WDM 激光器相比,KFC 不可替代的优点在于两个方面:能够将多个激光器集成在一个芯片上,以及这些激光器的超高光谱纯度。下面讨论 KFC 的这两个基本优点如何促进 WDM 光纤通信。

3.1 KFC 实现长途 WDM 传输

对于长途核心和城域光纤通信网络,KFC 的超高光谱纯度将具有很大的价值。特别是对于像海底电缆这样的长途光纤,频谱的利用是最重要的。如上文所述,孤子态 KFC 的频率间隔的随机变化可以很容易地控制在几兆赫内,这意味着相邻 WDM 信道之间的保护间隔也可以设置为兆赫水平。也就是说,与商用 ITLA 的典型频率稳定性(例如 ± 2.5 GHz)相比,基于 KFC 的激光源在 100 GHz 和 50 GHz 信道 WDM 网络中分别具有约 5% 和 10% 的频谱节省潜力。考虑到长距离传输链路的巨大传输容量和前期投资,这样的频谱节省是非常重要的。

除此之外,如上文所述,通过使用超低噪声泵浦激光器(例如 <10 kHz 的综合线宽),几十条甚至几百

条 KFC 线路可以共同获得相同的线宽。这也适用于高阶相干数据调制格式,如 64-QAM、128-QAM 和 256-QAM,这些格式本质上要求载波的相位噪声要很低,以便在圆形相位空间内安排尽可能多的星座^[2]。

此外,对于相干光通信系统,数据载波和 LO 之间的频偏和相位漂移会随机旋转和扭曲接收数据信号的星座图,通常需要使用比较复杂和功耗较高的频偏估计(FOE)和载波相位估计(CPE)的 DSP 电路和算法(即消耗相干收发信机总能量的 3%~5%)。因此,利用 KFC 激光器作为发射载波和接收载波,其高频稳定性和窄线宽可以大大简化 FOE 和 CPE 的相关模块。笔者最近的研究^[20]强调了这一优点,证明了在远距离发射机和接收机中的两个孤子状态的 KFC 可以远程锁定彼此的频率和相位,使得 FOE 和 CPE 过程大大简化,消耗的能量比使用传统 WDM 激光器(如 ITLA)少 1000 倍^[21]。

此外,在长距离光传输中,光纤链路的色散(CD)、偏振模色散(PMD)和克尔非线性不可避免地会降低数据质量。对于相干数据接收机,当到达的数据与低频激光混合并通过外差或零差或内差探测下转换为基带后,通常由 DSP 模块来补偿链路损伤^[2]。重要的是,LO 的线宽可以深刻地影响性能的光纤损伤补偿。例如,当采用自适应均衡器进行 CD 和 PMD 补偿时,本振相位噪声与离散数据信号的混合会导致有害的均衡增强相位噪声(EEPN)^[22],随着波特率和远距离传输的增大,均衡器的性能会严重下降。同样,由 KFC 芯片提供的窄线宽载波和 LO 激光器可以减轻 EEPN 并降低相关的能量消耗,因为基于 DSP 的 CD 和 PMD 补偿算法消耗了近 20% 的收发信机能量^[3-4]。

值得注意的是,利用数字反向传播(DBP)算法^[23],KFC 线作为载波和 LO 激光器之间的高相干性可能有助于光纤非线性的补偿,但这种方案的实际可行性和实际效益需要进一步确认。

3.2 用于 WDM 数据中心互连的 KFC

提高 DCI 网络容量的另一个趋势是探索相干数据调制和检测,前提是长距离相干系统相比,成本和功耗需要大幅度降低。值得注意的是,对于 DCI 网络,链路损伤如 CD、PMD 和非线性变得非常弱,因此这些相关的数字均衡可以被简化甚至完全删除。另

一方面,无论数据传输距离多远,只要载波和 LO 之间不是完全一致的,一个连贯的系统总是需要用于 FOE 和 CPE 的 DSP 模块。因此,孤子状态 KFC 线的高稳定频率和低相位噪声能够显著简化 FOE 和 CPE,对于降低相干 DCI 链路的最终能量消耗可能起到关键作用。此外,利用孤子态 KFC 还有望进一步推动无需 DSP 处理的模拟相干传输系统解决方案,如采用模拟电路进行偏振解复用、时钟和载波恢复^[24],或采用相干数据和光载波在单纤中传输的“同源自相干”方法等。同源自相干方法可以最大限度地减少光源相位噪声的影响,省略频率偏移,从而允许使用波长解锁激光器,简化 DSP 算法^[25],再结合孤子态 KFC 可以作为多波长光源,调节孤子微梳的频率与相位,可以在性能、功耗和简单性方面显著改善光相干通信^[21]。重要的是,高光谱纯度激光器在大多数无 DSP 连贯系统的设计中都具有很高的价值,这也鼓励研究人员一直把 KFC 看作是连贯 DCI 链路的一个潜在构件。

4 结 论

文中综述了 KFC 技术,旨在为 WDM 光纤通信提供一种新型的高性能集成激光源。介绍了 KFC 设备的制作方法,以及 KFC 产生的基本物理原理。特别地,解释了所有 KFC 线的光谱纯度与单个连续波泵浦激光器的光谱纯度相当,因此,使用一个超稳定的窄线宽泵浦激光器,可以同时获得数十乃至数百个超稳定窄线宽 KFC 激光器。从技术经济的角度来看,由于高端泵浦激光器的成本、功率和器件模块面积可以由多台 KFC 激光器共同分担,这对提高 WDM 系统的频率精度是一个很好的机会。此外,还简要讨论了 KFC 如何有利于长距离 WDM 传输,以及 KFC 如何推动实现基于 WDM 的 DCI 网络。希望该文能够引起光通信界和微腔界的专家们的研究兴趣,来思考光纤通信激光源在未来的发展方向。

参考文献:

- [1] John S, Leonid K. Optical fiber communications: Principles and practice[J/OL]. Phys Today, 1987. <https://doi.org/10.1063/1.2820238>.
- [2] Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 157-179.
- [3] Liu X, Chandrasekhar S, Winzer P J. Digital signal processing techniques enabling multi-Tb/s superchannel transmission: An overview of recent advances in DSP-enabled superchannels [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(2): 16-24.
- [4] Pillai B, Sedighi B, Guan K, et al. End-to-end energy modeling and analysis of long-haul coherent transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(18): 3093-3111.
- [5] Hänsch T W. Passion for precision (Nobel lecture) [J]. *Chemphyschem*, 2010, 7(6): 1170-1187.
- [6] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [7] Pfeifle J, Brasch V, Lauer mann M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 375-380.
- [8] Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators [J]. *Nature Photon*, 2014, 8: 145-152.
- [9] Marin-Palomo P, Kemal J N, Karpov M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 274-279.
- [10] Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs [J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 365-369.
- [11] Kovach A, Chen D, He J, et al. Emerging material systems for integrated optical Kerr frequency combs [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1): 135-222.
- [12] Xiang C, Liu J, Guo J, et al. Laser soliton microcombs heterogeneously integrated on silicon [J]. *Science*, 2021, 373(6550): 99-103.
- [13] Lei F, Ye Z, Fülöp A, et al. Fundamental optical linewidth of soliton microcombs [J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2021: 2102.05517v1.
- [14] Weng W, Lucas E, Lihachev G, et al. Spectral purification of microwave signals with disciplined dissipative Kerr solitons [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 013902.
- [15] Liu J, Lucas E, Raja A S, et al. Photonic microwave generation in the X- and K-band using integrated soliton microcombs [J]. *Nat Photonics*, 2020, 14: 486-491.
- [16] Yi X, Yang Q F, Zhang X, et al. Single-mode dispersive waves and soliton microcomb dynamics [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14869.
- [17] Helgason S B, Girardi M, Ye Z, et al. Power-efficient soliton

- microcombs [J]. *arXiv*, 2022: 2202.09410.
- [18] Liu Y, Qiu Z, Ji X, et al. A photonic integrated circuit based erbium-doped amplifier [J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2022: 2204.02202.
- [19] Xue X, Zheng X, Zhou B. Super-efficient temporal solitons in mutually coupled optical cavities [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13: 616-622.
- [20] Wang W, Liu H, Yang J, et al. Mapping ultrafast timing jitter in dispersion-managed 89 GHz frequency microcombs via self-heterodyne linear interferometry [J]. *arXiv*, 2021: 2108.01177.
- [21] Geng Y, Zhou H, Cui W, et al. Coherent optical communications using coherence-cloned Kerr soliton microcombs [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1070.
- [22] Villafani D, Mirani A, Pang X, et al. Phase noise characterization and EEPN of a full C-band tunable laser in coherent optical systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, PP(99): 1-1.
- [23] Temprana E, Myslivets E, Kuo P P, et al. Overcoming Kerr-induced capacity limit in optical fiber transmission [J]. *Science*, 2015, 348(6242): 1445-1448.
- [24] Perin J K, Shastri A, Kahn J M. Design of low-power DSP-free coherent receivers for data center links [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4650-4662.
- [25] Gui T, Du H, Zheng K, et al. Real time 6.4 Tbps (8×800 G) SHCD transmission through 1+8 multicore fiber for co-packaged optical-IO switch applications [C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2022: 1-3.