# 线性光采样模拟前端研制与128 Gb/s 信号测试

黄炎 付松年 刘彬 柯昌剑 刘德明

华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室,湖北 武汉 430074

**摘要** 面对100 Gb/s 光纤传输系统性能监测需求,自主研制完成高速线性光采样模拟前端。其内部由1个被动锁模 光纤激光器产生脉宽为2 ps、重复频率为96.25 MHz的采样光脉冲,待测偏振复用四相移键控(PDM-QPSK)信号和 采样光脉冲进入光混频器后完成偏振相位分集探测,利用模拟带宽为400 MHz的平衡探测器完成光电转换后,将4 路模拟信号传入主机进行数字化处理,获得高速光信号时域分析结果。通过优化设计,实现被动锁模光纤激光器 的脉冲功率、中心波长、重复频率稳定输出。利用商用128 Gb/s PDM-QPSK 信号对工程样机和安捷伦调制信号分 析仪 N4391A 展开对比测试,测试结果表明工程样机可获得相同的时域参数分析结果。 关键词 光纤光学;全光采样;被动锁模光纤激光器;光纤通信;复杂调制码型 中图分类号 TN27 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201636.0206002

Optimization of Linear Optical Sampling Analog Front-End and Test for 128 Gb/s Signals

Huang Yan Fu Songnian Liu Bin Ke Changjian Liu Deming

National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** A temporal signal measurement equipment for current 100 Gb/s fiber optic transmission, based on the linear optical sampling technique, is proposed and experimentally demonstrated. In the self-developed prototype, a passively mode-locked fiber laser is used as optical sampling source with a pulsewidth of 2 ps and repetition frequency of 96.25 MHz. Then, the polarization division multiplexing quadrature phaseshift keying (PDM-QPSK) signal under test is optically mixed with the sampling pulse before phase and polarization diversity detection. With the help of four-channel 400 MHz balanced photodetectors, four-channel analog signals are transmitted to the mainframe, for the purpose of digital signal processing and result display. By optimizing the design, pulse power, central wavelength, repetition frequency of passively mode-locked fiber laser can be output stably. Furthermore, the performance comparison with the counterpart from Agilent modulation format analyzer (N4391A) is carried out, and it's verified that the prototype has almost the same capability for on-site measurement.

**Key words** fiber optics; all- optical sampling; passively mode- locked fiber laser; fiber communication; complex modulation format

**OCIS codes** 060.1660; 140.4050; 060.4080

1 引 言

伴随惊人的发展速度,光纤通信的终极目标仍然是获取更大的传输容量和更长的传输距离,以满足人们 日益增长的通信容量需求。目前光纤通信系统中性能监测普遍采用电域采样,但这种测量方法受采样时钟精 度、采样保持电路弛豫时间、载流子迁移率等瓶颈制约,并且主要局限于强度参数分析。面对严峻的挑战,国

收稿日期: 2015-07-17; 收到修改稿日期: 2015-09-14

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ160487)、国家自然科学基金(61377073)

作者简介:黄 炎(1990—),男,硕士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail:huangyan\_hust@163.com

导师简介:付松年(1975—),男,博士,教授,主要从事高速光纤通信方面的研究。

E-mail:songnian@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

内外学者提出了全光采样技术,即先在光域对信号进行采样,再经过低速光电探测器转化为模拟电信号。全 光采样可分为非线性和线性两种。非线性光采样技术利用光学材料非线性效应对高速光信号进行采样,但非 线性光采样只能测量高速信号的强度信息,无法提供光相位信息。为了弥补此缺点,2003年,美国贝尔实验室 Dorrer 等<sup>11</sup>首次提出线性光采样的概念,将全光采样与相干探测相结合,以获得待测光信号的全场参数。2005 年,他实现了线性光采样系统,在光采样脉冲重复频率为10 MHz、平衡探测器模拟带宽为800 MHz的条件下, 恢复得到 640 Gb/s 的强度调制信号及 40 Gb/s 相位调制信号的星座图和眼图<sup>12</sup>。2005年,瑞典查尔莫斯理工大 学 Westlund 等<sup>33</sup>针对线性光采样技术提出软件时钟同步方法,可在采样脉冲重复频率远低于奈奎斯特采样频 率的欠采样条件下完成信号眼图重建。2012年,该研究组利用线性光采样技术实现了100 Gb/s偏振复用-四 相移键控(PDM-QPSK)光信号监测。待测光信号由字长为2<sup>15</sup>-1伪随机序列调制产生,然后由主动锁模光纤激 光器产生1GHz 重复频率的采样光脉冲,与待测光信号进入90°光学混频器完成相干接收,进入4路模拟带宽 为1 GHz的平衡探测器,数字化处理后得到高速光信号的眼图、星座图等时域参数分析结果<sup>19</sup>。国内全光采样 技术研究虽然还处于起步阶段但也取得了令人鼓舞的研究进展。2009年,天津大学研究人员基于线性光采样 原理,仿真研究10 Gb/s非归零-相移键控(NRZ-BPSK)信号的测量,当采样脉冲重复频率降至10 MHz时,可获 得相位差为180°的BPSK信号星座图<sup>[5]</sup>。2010年,清华大学冯勇等<sup>[6]</sup>利用半导体主动锁模激光器产生重复频率 为2GHz、脉冲宽度为1ps的采样光脉冲,完成了20Gb/s偏振复用差分相移键控(PDM-DPSK)信号线性光采样 实测报道。2012年,北京理工大学研究人员提出一种异步降频光采样技术<sup>[7]</sup>,通过线性调频Z变换算法(CZT)对 采样信号进行眼图重构和 Q 值监测,提高了算法精度与计算时间,可以推广应用于线性光采样<sup>18</sup>。

面对 100 Gb/s 光纤通信系统性能监测需求,自主研制完成高速线性光采样模拟前端。利用被动锁模光纤激光器产生脉宽为2ps、重复频率为96.25 MHz的采样光脉冲,利用4个模拟带宽为400 MHz平衡探测器(balance PD/BPD)实现光电转换,进入数据采集卡 PXIe进行数字化采集和处理后,恢复出待测高速光信号的星座图与眼图。通过优化设计,实现采样脉冲激光器的脉冲平均功率、脉冲重复频率、中心波长稳定输出。利用商用 128 Gb/s PDM-QPSK 信号对目标仪器展开实时现场测试,并与安捷伦高速调制信号分析仪(N4391A)的测试结果进行对比。结果表明自主研制的工程样机具有与进口仪器性能相当的时域参数分析能力。

## 2 高速线性光采样模拟前端的研制

#### 2.1 线性光采样原理

线性光采样模拟前端一般包括全光采样与相干探测2部分。全光采样是指利用超短脉冲光作为采样门,对待测高速光信号进行采集,得到样本光信号,再通过低速平衡探测器(PD)将其转化为模拟电信号,进行数字化采集和处理。由于光脉冲采样后得到的样本信号速率与采样光脉冲的重复频率相当,远远低于原始待测光信号,从而可使用低速光电探测器完成光电转化,大大降低了硬件成本。相干探测是指采样光脉冲的光谱与待测光信号的光谱有充分重叠时,待测信号光与采样脉冲光发生相干混频,即实现相干采样。在相干采样的过程中,采样脉冲与待测高速信号有固定的相位差,这使得采集得到的样本光中保留了待测信号光携带的相位信息。当采样光脉冲3 dB 光谱宽度是待测光信号 3 dB 光谱宽度的 2 倍以上时,且光谱充分重叠就可以实现无失真线性光采样,因此线性光采样技术可以实现对 100 Gb/s 以上高速复杂调制码型光信号的时域分析。图 1 中 linear optical sampling block 表示基于线性光采样原理的样机模拟前端中光路结构, bias and monitoring block 表示样机模拟前端的驱动电路框图,模拟前端 4 路低速模拟数据回传到主机后,主机完成数字化采集和数字信号处理,并显示出时域分析结果。模拟前端和主机共同构成一个完整的宽带高速光电信号分析仪。待测信号光 E<sub>in</sub>(t) 和采样脉冲光 E<sub>to</sub>(t) 进入 90°光学混频器时,首先经由偏振分束器(PBS)分为4束光 E<sub>inx</sub>、E<sub>inx</sub>、E<sub>iny</sub>,其表达式分别为

$$E_{\rm in}(t) = A_{\rm in}(t) \exp(j\omega_{\rm in}t) , \qquad (1)$$

$$E_{\rm LO}(t) = A_{\rm LO}(t) \exp(j\omega_{\rm LO}t) , \qquad (2)$$

$$\begin{bmatrix} E_{\text{in},x} \\ E_{\text{in},y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma} A_{\text{in}} \\ \sqrt{1-\gamma} A_{\text{in}} \end{bmatrix} \exp(j\omega_{\text{in}}t) , \qquad (3)$$

0206002-2

光学学报



图 1 线性光采样模拟前端结构框图 Fig.1 Scheme of linear optical sampling analog front-end

$$\begin{bmatrix} E_{\rm LO,x} \\ E_{\rm LO,y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} A_{\rm L0}(t) \\ A_{\rm L0}(t) \end{bmatrix} \exp(j\omega_{\rm L0}t) \quad , \tag{4}$$

式中  $A_{in}(t)$ 、 $A_{10}(t)$ 分别是待测信号和采样脉冲的振幅, $\omega_{in}$ 、 $\omega_{10}$ 分别是待测信号和采样脉冲的角频率。  $\gamma$ 是 90°光学混频器中 2 个偏振分量的光功率比。经过偏振分束后的 4 束光进入混频器后发生相干混频。由于 是零差相干,因此要求信号光的波长与本征光的波长近似一致,即 $\omega_{in}$ 要近似等于 $\omega_{10}$ 。假设  $\gamma$ 等于 0.5,在 相干混频作用下输出的 8 组信号  $E_{1,2}$ 、 $E_{3,4}$ 、 $E_{5,6}$ 、 $E_{7,8}$ 进入 4 个低速平衡探测器中完成光电转换,获得 4 路低 速模拟电信号,如(5)式所示。

$$I_{BD1} = \sqrt{2} R_1 A_{in} A_{L0} \cos[(\omega_{in} - \omega_{L0})t + \delta_1]$$

$$I_{BD2} = R_2 A_{in} A_{L0} \sin[(\omega_{in} - \omega_{L0})t + \delta_2]$$

$$I_{BD3} = R_3 A_{in} A_{L0} \cos[(\omega_{in} - \omega_{L0})t + \delta_3]$$

$$I_{BD4} = \sqrt{2} R_4 A_{in} A_{L0} \sin[(\omega_{in} - \omega_{L0})t + \delta_4]$$
(5)

式中 *I*<sub>BD1</sub>、*I*<sub>BD2</sub>、*I*<sub>BD3</sub>、*I*<sub>BD4</sub>是4个平衡探测器输出的模拟信号,*R*<sub>1</sub>、*R*<sub>2</sub>、*R*<sub>3</sub>、*R*<sub>4</sub>分别是4个平衡探测器的响应 度,*A*<sub>in</sub>、*A*<sub>L0</sub>分别是待测信号光与采样脉冲的振幅。由于工艺限制每个平衡探测器中的2个光电二极管(PD) 的响应度不会完全相同,数字信号处理中需设置相应的算法弥补这种增益失配。*δ*<sub>1</sub>、*δ*<sub>2</sub>、*δ*<sub>3</sub>、*δ*<sub>4</sub>是*I*<sub>BD1</sub>、*I*<sub>BD2</sub>、 *I*<sub>BD3</sub>、*I*<sub>BD4</sub>的相位信息,由3个部分组成:采集过程中产生的相位噪声、信号光的初始相位、采样脉冲光的初始 相位,通过数字信号处理中载波相位恢复算法可以消除相位噪声,恢复出信号光的相位信息。模拟前端中采 样脉冲光源是由基于半导体可饱和吸收体(SESAM)的被动锁模光纤激光器产生,重复频率为96.25 MHz、脉冲 宽度为2 ps、时间抖动为142.6 fs。平衡探测器选用Throlabs公司的光纤耦合平衡放大光电探测器 BDP470, 带宽为400 MHz。可以看出自主研制的模拟前端显著降低了对光电器件的速率要求。

样机电路如图1中bias and monitoring block 所示,按功能可分为3个模块:激光器驱动模块、平衡探测器驱动模块以及接口电路。激光器驱动模块主要为被动锁模光纤激光器提供温控管理和恒流驱动。由于外界条件变化会影响激光器输出光谱、中心波长、平均功率等性能,因此保证激光器稳定是保证线性光采样性能的先决条件。恒流驱动可以防止抽运源功率波动导致的采样光脉冲的功率波动,并且降低浪涌电压、静电、谐波振荡等电域不利因素对激光器输出的影响。平衡探测器模块负责给4个平衡探测器提供线性稳压电源,并读取其工作状态。接口电路根据PXIe硬件规范<sup>19</sup>设计硬件接口,选用混合插槽(Hybrid Slot)实现模拟前端与数据采集卡的通信,将模拟前端各器件的工作状态传回主机,便于主机监测线性光采样模拟前端的工作状态。

#### 2.2 被动锁模光纤激光器优化设计

模拟前端中的被动锁模光纤激光器由抽运光源、高掺杂掺铒光纤、可饱和吸收体、偏振控制器以及激光器 驱动模块等部分组成100。对激光器驱动模块进行优化设计,大幅降低温度漂移、电流电压波动等不利因素对激 光器造成的影响,驱动电流稳定性达到0.1%,温度控制偏差小于±0.2%℃。激光器驱动模块包括温度控制与 恒流驱动。温度控制由温度传感电路、温控(TEC)电路、比较调节电路、温度报警电路构成。温度传感电路中温 度采集选用 DALLAS 公司的数字温度传感器 DS18B20,将采集的温度以数字形式通过1个端口传输进 ARM 处 理器中。TEC电路中TEC型号选用TEC1-12710,其控制芯片选用AD公司的热电制冷微控制芯片MAX1978。 由于环境温度可能与激光器的最佳工作温度不一致,使得TEC经常需要持续工作,选用TI公司的功率驱动器 DRV591构成开关稳压电源,以脉冲宽度调制(PWM)方式驱动TEC。比较调节电路基于数字比例-积分-微分 控制器(PID)调节器实现热控制循环,将温度传感器采集到的温度参数和设定的温度参数进行对比,保证激光 器工作在最佳温度点附近。温度报警电路当环境温度、激光器温度在正常范围外时及时发出警告信号,并在 一定时间内自动关断电路。恒流驱动由功率采集电路、恒流驱动电路、保护电路、比例-积分(PI)控制电路组成。 功率采集电路通过集成式光电功率接收器采集激光器输出的平均光功率,通过与参考值的比较来判断输出光 功率的波动幅度。恒流驱动电路核心芯片选用TI公司的精密放大器 OPA569,其最大连续输出电流超过2A, 可以满足输出功率要求。保护电路从电流限制和电压钳位2方面防止过流过压、浪涌静电、电流过热等不利因 素对器件造成损伤。电流限制采用过流保险元件结合电流监测的方式,电压钳位采取稳压管和TVS二极管互 补搭配的方法,既可以持续接受较大的耗散功率,又具有小于100 ns的较快响应速度。PI控制电路基于 PI 控 制原理,将恒流源实际输出与设置值进行偏差控制,偏差比例P和积分I通过线性组合构成控制量,实现电流输 出值对电流设定值的跟踪,保证激光器的恒流抽运。图 2~4分别显示了激光器驱动模块优化前后,采样光脉冲 的中心波长、重复频率、平均光功率的连续120 min的测试结果。经过电路优化设计之后,采样光脉冲的稳定 性显著提升,为线性光采样及后端信号处理奠定了坚实的基础。









Fig.4 Characterization of average power of sampling pulses

0206002-4

## 3 128 Gb/s PDM-QPSK 信号对比测试

利用烽火通信公司 FONST 5000光传送网设备产生单波长波特率为 31.788 Gbaud,比特率为 127.15 Gb/s, 调制格式为 PDM-QPSK 的商用高速光信号,中心波长为 ITU-T 标准信道 34(1550.12 nm)。此商用 128 Gb/s PDM-QPSK 光信号是由真实网络业务汇聚而成,内含前向纠错码和网管信息,其码元具有真随机性。而选择 PDM-QPSK 调制格式是因为光互联论坛(OIF)与 IEEE 协会先后提出技术文件和标准<sup>III</sup>,建议 PDM-QPSK 调制码型为 100 G以太网主流调制技术。我们搭建的对比测试实验装置,如图 5 所示,商用 128 Gb/s PDM-QPSK 光信号经 过 50:50 光纤耦合器均匀分为 2 部分,分别输入样机和安捷伦调制信号分析仪 N4391A。安捷伦 N4391A 由相 干接收机、可调谐激光器、实时示波器、矢量分析软件 4 部分组成。其内置可调谐激光器产生波长可调谐连续 激光输出,作为相干接收机的本振信号源,每次测量时其输出波长需要精确调谐到与待测信号光的工作波长 一致。相干接收机完成信号相干探测,并利用模拟带宽高达 32 GHz 的 4 个差分光电探测器完成光电转换,产 生 4 路高速模拟信号。实时示波器具有 32 GHz 模拟带宽,按照奈奎斯特采样定律对输入高速模拟信号完成采 样和量化。矢量分析软件对数字化后的信号实现采样前端修正、数据归一化、时钟恢复、载波恢复,最终得到 星座图、眼图等时域参数分析结果并显示。与此同时,待采样的高速光信号亦输入自主研制的模拟前端完成 线性光采样,采样后的电信号经由 4 根电缆传入主机完成数字化采集,主机进行数字信号处理后显示待测信号 的星座图、眼图等时域参数分析结果。



图 5 128 Gb/s PDM-QPSK 信号对比测试装置图

Fig.5 Measurement comparison for 128 Gb/s PDM-QPSK signal

测试中发现,当待测信号中心波长在1550.12 nm 附近变化±0.8 nm 时,工程样机测试结果不受影响,而每次使用安捷伦 N4391A 测试前,均需要校准内置可调谐激光器,使得脉冲波长和待测信号波长一致;并且当环境等因素使入射信号光波长发生漂移时,均需相应地调整安捷伦仪器内置可调谐激光器的波长。这是因为采样前端4路模拟信号中包含采样脉冲与待测信号光的频差 ω<sub>in</sub> -ω<sub>10</sub>,虽然数字信号处理中频偏算法可以对其进行补偿,但当频差过大时会影响星座图、眼图的显示。工程样机根据全光采样原理,采样光脉冲的重复频率远低于奈奎斯特采样频率,只要采样脉冲3 dB 光谱宽度是待测信号 3 dB 光谱宽度的 2 倍以上就可实现无失真采样。图6显示了128 Gb/s PDM-QPSK 待测信号光谱与采样脉冲光谱图,由于工程样机所使用的采样光脉冲3 dB 光谱宽度为 1.16 nm,因此理论上可对速率高达 290 Gb/s 的 PDM-QPSK 完成时域参数分析。对比测试表明,工程样机比安捷伦仪器能容忍更大的待测信号光波长漂移,且具有同时测试多个ITU-T波长信道的潜力。

图7对比显示了128 Gb/s PDM-QPSK高速光信号时域参数测试结果。图7(a)是安捷伦N4391A的测试结果, 图7(b)是工程样机测试结果。对比测试结果,样机的眼图上升/下降沿更陡峭,样机的眼高也较之安捷伦分析仪 更高,样机具有更好的抗噪声性能。这是由于安捷伦仪器内部采用的高速光电探测器的模拟带宽只有32 GHz, 因此对128 Gb/s PDM-QPSK待测光信号而言,已经达到其光电转换的上限,因此眼图的上升/下降时间变缓。工 程样机基于采样技术,采样脉冲的重复频率远低于奈奎斯特采样频率,采样点数相比安捷伦分析仪较少,因此 恢复出的星座图、眼图点数没有安捷伦分析仪密集,但是敛散性能相当。







图 7 128 Gb/s PDM-QPSK 信号时域参数测试结果对比。(a) 安捷伦仪器; (b) 工程样机

Fig.7 Comparison test results for 128 Gb/s PDM-QPSK signals. (a) Agilent analyzer; (b) self-developed prototype

在长时间工作条件下,图8显示对商用128 Gb/s PDM-QPSK 信号的误差向量幅度(EVM)对比测试结果。 样机的 EVM测试数值与安捷伦仪器接近,甚至略低于 N4391A 的计算结果,这是因为样机采用的是欠采样技术,采集点数较少,因此计算出的 EVM 更加理想。对比测试验证了样机长时间工作的稳定性,并且测量得到的 EVM 数值变化趋势与安捷伦仪器结果相符。



图 8 1550.12 nm 128 Gb/s PDM-QPSK 信号 EVM 对比测试结果 Fig.8 Comparison test results for EVM of 1550.12 nm 128 Gb/s PDM-QPSK signals

## 4 结 论

面对 100 Gb/s 光纤传输系统性能监测需求,自主研制高速线性光采样模拟前端工程样机,完成了由烽火公司 FONST 5000平台产生的商用 128 Gb/s PDM-QPSK 信号对比测试。模拟前端由被动锁模光纤激光器产生, 重复频率为 96.25 MHz、脉冲宽度 2 ps 的采样光脉冲,和待测信号光发生相干混频,经过 400 MHz 平衡探测器完成光电转换并将 4 路模拟信号传回主机,通过数字信号处理恢复出原始信号的星座图、眼图,并给出 EVM 等时

## 光学学报

域参数分析结果。对采样脉冲激光器的恒流驱动、温控管理等电路开展优化设计,稳定采样光脉冲的中心波 长、重复频率、平均光功率。对比测试表明,由于工程样机的采样脉冲光谱较宽,因此具有较强的待测信号波 长偏移容忍度,测试所得眼图的上升/下降沿更加陡峭,但由于线性光采样得到采样点较少,样机的星座图不如 安捷伦仪器获得的星座图采样点密集,两者时域参数分析结果相符。

## 参 考 文 献

- 1 Dorrer C, Kilper D, Stuart H, et al.. Linear optical sampling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(12): 1746-1748.
- 2 C Dorrer, C R Doerr, I Kang, et al.. Measurement of eye diagrams and constellation diagrams of optical sources using linear optics and waveguide technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 178-186.
- 3 M Westlund, H Sunnerud, M Karlsson, et al.. Software-synchronized all-optical sampling for fiber communication systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1088-1099.
- 4 H Sunnerud, M Sköld, M Westlund, et al.. Characterization of complex optical modulation formats at 100 Gb/s and beyond by coherent optical sampling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3747-3759.
- 5 Lu Hongwang. Research on Highspeed DPSK and Coherent Optical Communication Systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 44– 55.

卢宏旺.高速DPSK与相干光通信系统研究[D].天津:天津大学,2009:44-55.

- 6 Feng Yong. Digital Optical Coherent Detection and Its Application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 33-47. 冯 勇. 数字相干光检测研究与应用[D]. 北京:清华大学, 2010: 33-47.
- 7 Lai Junsen, Yang Aiying, Sun Yunan. Application of chirp-Z transform to the optical-sampling optical performance monitoring[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(7): 833-837.

赖俊森,杨爱英,孙雨南.线性调频Z变换在光采样光性能监测中的应用[J].北京理工大学学报,2011,31(7):833-837.

8 Lai Junsen, Yang Aiying, Sun Yunan. Optical fiber communication performance monitoring based on asynchronous delay tap sampling [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106004.

赖俊森,杨爱英,孙雨南.基于异步延迟采样的光通信性能监测方法[J].光学学报,2012,32(11):1106004.

- 9 National Instruments. PXI Express Hardware Specification Revision 1.1[S]. 2008.
- 10 Ren Jun, Wu Sida, Cheng Zhaochen, *et al.*. Mode-locked femtosecond erbium-doped fiber laser based on graphene oxide versus semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602013.

任 军, 吴思达, 程昭晨, 等. 基于氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜的锁模飞秒掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602013. 11 Berthold J, Hutchins J, GassK, *et al.*. 100 G ultra long haul DWDM framework document[C]. OIF, 2009.

栏目编辑: 王晓琰