

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.014

# 一种用于精密测量的双脉冲序列光纤激光源\*

孟阔 祝连庆 娄小平 董明利

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100016)

**摘要:**因为锁模光纤激光脉冲具有峰值功率高,脉宽窄等特点,可有效应用于高精密远程测距及信息传输等方面。报道了一种基于石墨烯锁模的全保偏掺铒光纤环形短腔实现双锁模脉冲序列激光输出方法。利用多层石墨烯可饱和吸收镜可实现被动锁模脉冲序列的稳定输出,并通过衰减器主动调制腔内损耗,可有效控制不同波长处激光的增益与损耗。实验表明,基于10层石墨烯可饱和吸收镜,调制增益平衡,在全保偏光纤激光短腔内可分别独立实现波长1 531和1 557 nm处的锁模脉冲序列激光输出,重复频率约57 MHz,线偏振度可达19 dB。

**关键词:** 石墨烯; 光纤激光; 锁模; 精密测量

**中图分类号:** TN24      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 140.3060

## Fiber laser source with dual-pulse-train for accurate measurement

Meng Kuo Zhu Lianqing Lou Xiaoping Dong Mingli

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing, 100016, China)

**Abstract:** Mode-locked fiber laser has the properties of high peak-power and narrow pulse-width, and can be effectively applied in high-accurate remote ranging and information transmission. In the paper, a method of realizing dual-pulse-train mode-locked laser in an all-polarization-maintaining Er-doped fiber cavity based on graphene saturable absorber is reported. Based on multi-layer graphene saturable absorber mirror, stable mode-locked fiber laser can be obtained, and cavity loss can be operated by modulating an attenuator in the cavity. By adjusting the gain and loss of laser signal at different wavelength, dual-pulse-train laser centered at 1 531 nm and 1 557 nm can be realized, repetition frequency 57 MHz and extinction ratio of output laser can be up to 19 dB.

**Keywords:** graphene; fiber laser; mode-locked; accurate measurement

## 0 引言

光纤激光器因其体积小, 紧凑耐用, 操作方便等优点在精密测量方面<sup>[1-2]</sup>具有无与伦比的优势, 在许多领域具有广泛的用途。比如, 通过比较全光纤激光多普勒零差检测光路, 解决光路中存在的光能量损耗大, 干涉图对比度低、信噪比低等问题<sup>[3]</sup>。光纤激光还可以应用于快速、高精度的靶位自动检测和定位<sup>[4]</sup>, 及高精度测距<sup>[5]</sup>等。近年来, 石墨烯作为可饱和吸收体实现光纤激光锁模成

为研究热点, 这主要归因于石墨烯具有很宽的工作波长范围, 超快恢复时间, 制作方便和成本低廉等优点。国际上对石墨烯应用于光纤激光锁模实现超快脉冲输出的研究尚处于初步阶段, 主要集中在英国剑桥大学和新加坡南洋理工大学研究组。他们的主要研究工作是在1.5  $\mu\text{m}$ 波段利用石墨烯锁模, 获得皮秒量级甚至几百 fs 的光纤脉冲激光稳定输出。2009年, Bao等人<sup>[5]</sup>使用单层石墨烯作为锁模光纤激光器的可饱和吸收体首先实现了通信波段的超短孤子脉冲输出, 脉冲宽度达到756 fs。他们证实了由于泡利阻塞效应, 零带隙材料石墨烯在强

收稿日期: 2017-08      Received Date: 2017-08

\* 基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT1212)、北京市科技计划 (Z151100003615010)、北京市教委 2015 年度创新能力提升计划 (TJSHG201510772016)、北京市教委科技计划 (KM201611232008) 资助项目

激光激发下可对很宽的光谱激光实现可饱和吸收。他们还研究了石墨稀厚度变化,其对激光调制深度也发生明显变化。2010年,剑桥大学 Sun 等人利用化学方法制成了石墨烯-聚合物的混合膜可饱和吸收体实现掺铒光纤激光器的锁模研究,锁模激光的中心波长 1 559 nm,光谱宽度约 5 nm,脉宽 460 fs。同一年,该课题组将锁模激光脉冲压缩到 174 fs,大大推动了石墨烯光子学的研究进展。Zhao 等人<sup>[6]</sup>首次把石墨烯应用于掺铒光纤激光器的锁模研究中。近几年来,国内外对石墨烯可饱和吸收体的锁模特征进行了大量的研究。在国内,主要有北京工业大学和西安光机所等研究机构在深入研究石墨烯可饱和吸收材料<sup>[7-8]</sup>。

中心波长可切换的锁模激光器能在不同的中心波长处产生脉冲序列,可应用于光传感、光信号处理和光通信中。相比于一些利用主动锁模的波长切换脉冲激光器,被动锁模激光器能产生更短的脉冲。利用非线性偏振旋转技术,研究人员在光纤环形腔中观察到多波长的锁模脉冲输出<sup>[9]</sup>。基于半导体可饱和吸收镜的锁模激光器也成功实现了波长调谐耗散孤子运转<sup>[10]</sup>。近几年,基于单壁碳纳米管<sup>[11]</sup>和石墨烯<sup>[12]</sup>可饱和吸收体可实现多波长可调谐锁模脉冲输出。在这些被动锁模激光器结构中,输出脉冲通过腔内的光学滤波器进行脉冲输出波长选择,或者利用腔内双折射效应达到滤波的效果。但多数情况下,这些激光器输出的可调谐波长相邻间隔只有几纳米,且对光损伤阈值敏感,受环境影响较大,制备比较昂贵。

双波长锁模激光器可以同时提供两个不同中心波长的超短脉冲源,极大地降低了激光器的成本,在波分复用系统和长距离激光探测等方面有重要的应用价值。此

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 \exp[i(\Delta\phi/2 + \Delta\phi'/2)] - \sin\theta_1 \sin\theta_2 \exp[-i(\Delta\phi/2 + \Delta\phi'/2)] \\ - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \exp[-i(\Delta\phi/2 + \Delta\phi'/2)] - \cos\theta_1 \sin\theta_2 \exp[-i(\Delta\phi/2 + \Delta\phi'/2)] \end{bmatrix} \quad (4)$$

整理简化式(4),整个谐振腔的透射强度  $T_1$  可表示为:

$$|T_1|^2 = \cos^2\theta_1 \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_1 \sin^2\theta_2 + 1/2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\Delta\phi + \Delta\phi') \quad (5)$$

根据式(5),由 PC1、PC2 和 PS-ISO 产生的非线性偏振旋转效应,不仅可实现锁模光纤激光,同时,可调节腔内损耗,调制谐振腔信号增益与损耗平衡,从而获得锁模激光波长切换及双波长输出。该公式是实现锁模激光波长调节的线性透射模型。

本文将介绍一种全保偏光纤谐振腔,基于 10 层石墨烯膜实现稳定锁模激光输出。该结构具有避免外界压力及弯曲引起的光弹效应造成的折射率变化产生的锁模不稳定性;保持激光高线偏振度,易于实现锁模自启动;少偏振控制器件,减少腔内多余器件带来的损耗。

外,它为研究不同波长光波相互作用提供了完美的实验平台,丰富了锁模光纤激光理论。由于掺铒光纤具有较宽的增益谱,输出激光波长在很大范围内可以调谐。此外,在光纤双折射的作用下,基于非线性偏振旋转锁模的光纤激光器中会产生腔滤波效应<sup>[13]</sup>,使双波长锁模成为可能。此外,Chen 等人<sup>[14]</sup>利用环形腔光纤激光器在 1 560 和 1 600 nm 处同时实现了锁模,两种输出脉冲具有不同的强度和光谱特征。研究也发现,在“8”字腔<sup>[15]</sup>和半导体可饱和吸收镜锁模环形腔<sup>[16]</sup>中可获得双波长耗散孤子输出。

常用的锁模光纤激光波长调谐及切换技术是利用非线性偏振旋转实现的<sup>[15-17]</sup>。该激光谐振腔内主要由一个偏振隔离器和两端的偏振控制器组成。偏振控制器 PC1 把光转换为椭圆偏振态,可用变换矩阵如式(1)所示。

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \exp(i\Delta\phi/2) & \sin\theta_1 \exp(i\Delta\phi/2) \\ -\sin\theta_1 \exp(-i\Delta\phi/2) & \cos\theta_1 \exp(-i\Delta\phi/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\theta_1$  是 PC<sub>1</sub> 的偏振态偏转角度, $\Delta\phi$  代表偏振态的两个垂直分量的相位差。激光在光纤中传输可以由矩阵  $P$  表示:

$$P = \begin{bmatrix} \exp(i\Delta\phi'/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\Delta\phi'/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

激光在 PC2 中的偏振态改变可以由矩阵  $R_2$  表示:

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\Delta\phi'$  表示在光纤中产生的相位延迟, $\theta_2$  表示 PC2 产生的偏振态偏转角度。结合式(1)~(3),整个谐振腔的激光透射特征由  $T$  公式表示:

## 1 实验装置

实验装置主要由全保偏谐振腔组成:一个 980/1550 保偏波分复用器,1 m 保偏掺铒增益光纤,一个保偏环形器,10 层石墨烯可饱和吸收镜,一个保偏分束器,如图 1 所示。该腔由带单模尾纤输出的 976 nm 激光二极管(LD)反向泵浦,最大功率 750 mW。所用的保偏掺铒增益光纤(Nufem 公司,PM-ESF-7/125),吸收系数为 24 dB/m(976 nm),在 1 550 nm 波长处的群速度色散约  $-0.02 \text{ ps}^2/\text{m}$ 。保偏环形器具有很高的光隔离度(50 dB),可实现激光在腔内的单向传输,并可把石墨烯可饱和吸收镜有效接入到谐振腔内。本文采用的保偏环形器是特种环形器,端口 2 是由一个直径约 2 mm,长度约 4 mm,截面倾角具有  $8^\circ$  的短棒型光纤组成,可实现近

准直光输出,如图1右图所示。总腔长约3.5 m,总群速度色散约0.066 ps<sup>2</sup>。

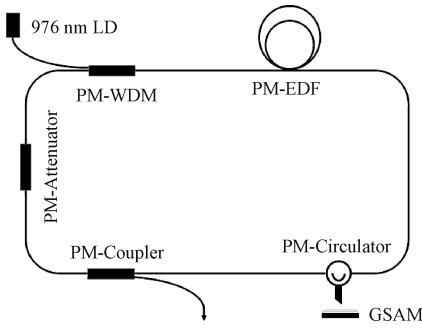


图1 光纤激光谐振腔装置  
Fig.1 Equipment of fiber cavity

实验中使用的石墨烯制备方法如下:首先通过化学气相沉积法(chemical vapor deposition)沉积在铜箔载片上,然后通过PMMA高分子介质逐层把石墨烯膜转移到金属反射镜上,利用丙酮将PMMA溶解,最后获得较为纯净的石墨烯膜。经测量,本实验中所用十层石墨烯可饱和吸收镜拉曼反射谱如图2所示。在波数1 617 cm<sup>-1</sup>处,高峰值代表石墨烯膜布里渊区活性特征激发光子所致;在波数1 351 cm<sup>-1</sup>处,峰的存在代表石墨烯膜的缺陷。从图2可以看出,缺陷峰较弱说明10层石墨烯膜保存较完整。

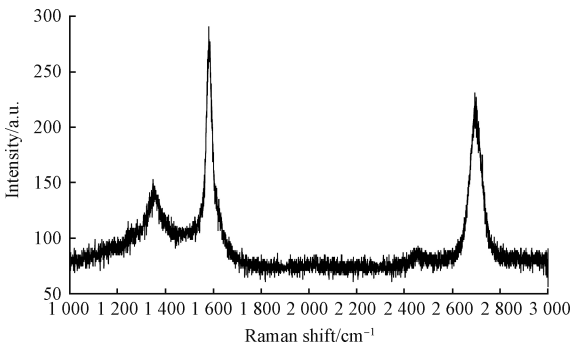


图2 10层石墨烯膜的拉曼谱  
Fig.2 Raman spectra of 10-layer graphene

实验中用于测量激光输出特征的设备有:光谱分析仪(Yokogawa AQ6375,分辨率0.02 nm)、频谱分析仪(Keysight EXA N9010A,带宽7.5 GHz)、示波器(LeCroy,带宽1.0 GHz)、自相关仪(Femtochrome, FR-103XL)、消光比分析仪(Santec, PEM-330),分别用于测量锁模激光的光谱、频谱、脉冲序列、脉宽及偏振度等。

## 2 实验结果及理论分析

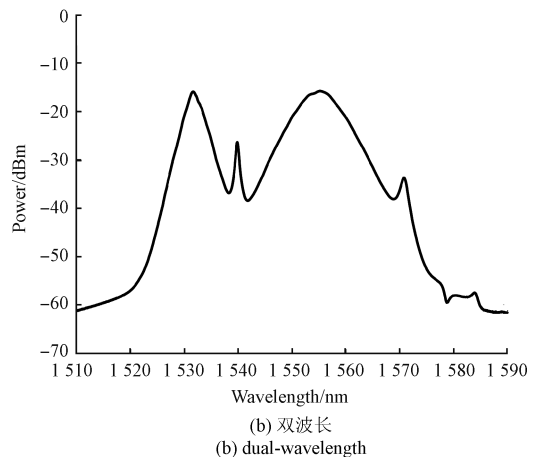
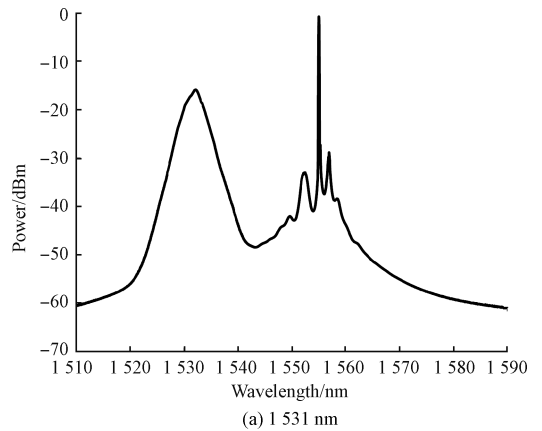
在实验中,通过精确调节石墨烯可饱和吸收体反射

镜角度,可实现全保偏光纤腔内锁模激光在波长1 531和1 557 nm处切换。因全保偏腔造成的腔内偏振控制器等器件省略,式(5)可简化为:

$$|T|^2 = A(\theta) + B(\theta)\cos(\Delta\phi) \quad (6)$$

式中: $\Delta\phi = \Delta\phi_{EM} + \Delta\phi_{NL} + \Delta\phi_{LB}$ 代表快慢轴净相位延迟, $\Delta\phi_{EM}$ 表示外调制器产生的相位延迟, $\Delta\phi_{NL}$ 表示腔内光纤非线性产生的相位变化, $\Delta\phi_{LB} = 2\pi LB_m/\lambda$ 表示光纤双折射造成的相位延迟。 $A(\theta)$ 和 $B(\theta)$ 代表因 $\theta$ 造成的强度损耗, $\theta$ 表示可饱和吸收镜的旋转角度。基于非线性偏振旋转效应产生的锁模激光中心波长调制, $\Delta\phi_{EM}$ 和 $\Delta\phi_{LB}$ 是由操作偏振控制器产生的腔内双折射引起的相位延迟; $A$ 和 $B$ 强度损耗项可由偏振控制器和隔离器共同调制实现。与非线性偏振旋转效应不同,本实验中 $\Delta\phi_{EM}$ 可由金属反射面造成的偏振调制产生; $\Delta\phi_{LB}$ 在全保偏光纤腔内是常数; $A(\theta)$ 和 $B(\theta)$ 两项可通过调制衰减器直接实现。在全保偏激光腔内,非线性偏振旋转效应引发的锁模可忽略不计。经定性讨论,该腔可通过衰减器调制腔内强度损耗实现锁模激光波长调节。

在泵浦光输入功率为150 mW时,通过精确调节腔内损耗,可实现在中心波长1 531和1 557 nm处双波长锁模激光输出。因增益损耗在这两个波长处达到平衡,可实现双波长输出,如图3(b)所示。另外,可通过调节



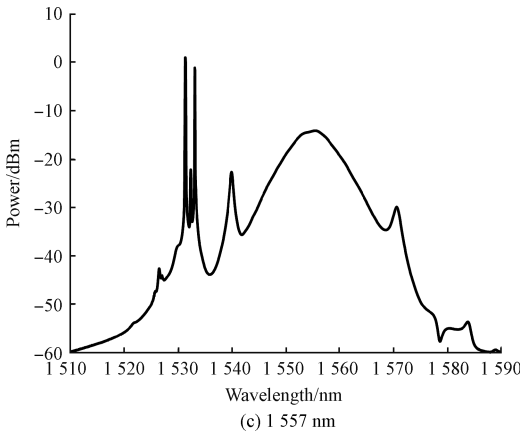


图3 不同波长锁模激光切换输出

Fig.3 Wavelength switching of mode-locked fiber laser

泵浦光功率可实现锁模激光波长切换输出,当降低泵浦光功率到 130 mW,可切换到中心波长为 1 531 nm 处锁模激光输出,谱宽 3.5 nm,输出功率 ~ 2.9 mW,如图 3 (a) 所示;当泵浦功率提高到 170 mW,中心波长可切换到 1 557 nm 锁模激光输出,谱宽 7.5 nm,输出功率 ~ 6.3 mW,如图 3(c) 所示。并且随着泵浦功率的提高,在光谱边缘出现明显的边带,部分原因是腔内直流分量微扰造成的。

经示波器测量输出激光脉冲特征,获得不同波长处锁模激光的脉冲序列。针对中心波长 1 531 和 1 557 nm 锁模激光输出,脉冲序列没有明显特征变化,脉冲序列间距 ~ 17.5 ns。当双波长输出时,明显有两个独立的脉冲序列共存于谐振腔(图 4),表明在两个波长处腔内激光分别独立锁模。

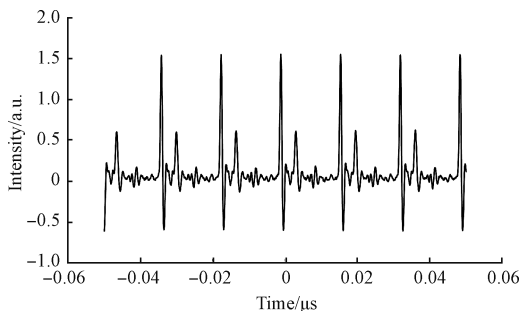


图4 双波长输出时锁模脉冲序列

Fig.4 Output of dual-wavelength mode-locked pulse train

利用频谱仪,测量了双波长锁模激光输出的频谱,如图 5 所示,在 57.1 MHz 附近,有两个很明显的独立基频峰,具有很高的信噪比。针对该全保偏光纤激光腔,输出的锁模激光应该保持线性偏振度。经消光比分析仪测量,在不同波长锁模激光输出的偏振消光比可达到

18 dB,保持很好的线偏振度。偏振角有所不同,在 1 531 nm 处,锁模激光偏振角 ~ -3.0°,在 1 557 nm 处锁模激光偏振角 ~ 8.3°。这种差别可归因于金属反射镜反射造成的激光偏振度变化,是引发腔内损耗的一个重要可能因素。

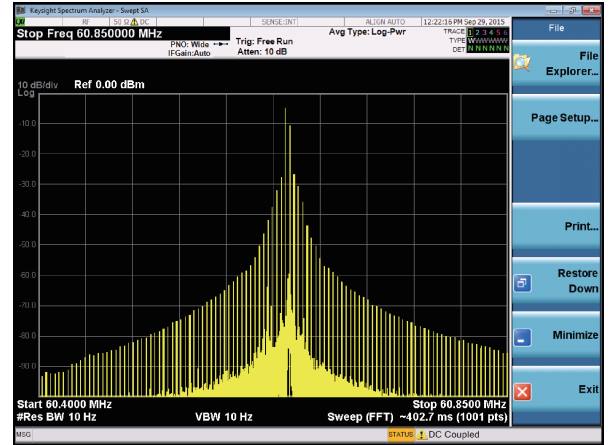


图5 双波长锁模激光输出的频谱

Fig.5 Fundamental frequency of dual-wavelength mode-locked laser

### 3 结论

本文研究了基于 10 层石墨烯可饱和吸收镜在全保偏掺铒环形腔中的锁模特性。在环形短腔内,基于衰减器调节腔内损耗,可实现中心波长 1 531 和 1 557 nm 处双波长锁模激光输出。深入研究了产生波长调节的内在物理因素,包括腔内强度损耗及相位延迟造成的不同波长处的激光增益与损耗。研究发现,实现双波长锁模激光输出的脉冲序列分别独立共存于激光谐振腔中,具有很高的稳定性。并且输出的锁模激光具有很高的线偏振度,可达 19 dB。

### 参考文献

[ 1 ] 李颖宏,马龙. 一种新型双激光测速系统的设计与应用[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(2):256-264.  
LI Y H, MA L. Design and application of a new dual laser velocimeter system [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 ( 2 ): 256-264.  
[ 2 ] 郝冬杰,王可宁. 激光多普勒测速光纤光路[J]. 国外电子测量技术,2017,36(3):35-38.  
HAO D J, WANG K N. Fiber optical path for laser Doppler velocity measurement [ J ]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(3): 35-38.  
[ 3 ] 宋薇,刘勰,章亚男,等. 高功率激光装置中靶的进

- 化式位姿检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 215-223.
- SONG W, LIU X, ZHANG Y N, et al. Evolutionary target pose measurement in high power laser device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 215-223.
- [4] 严瑾, 李筠, 杨海马. 基于 LabVIEW 的高精度激光干涉测距系统[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 172-177.
- YAN J, LI Y, YANG H M. High-precision laser interferometric displacement measurement system based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(4): 172-177.
- [5] BAO Q, ZHANG H, WANG Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed laser. Advanced Functional Materials [J]. 2009, 19(19): 3077-3083.
- [6] ZHAO L M, TANG D Y, ZHANG H, et al. Dissipative soliton operation of an ytterbium-doped fiber laser mode locked with atomic multilayer graphene [J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3622-3624.
- [7] 徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 基于氧化石墨稀被动锁模的窄线宽皮秒脉冲掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702002.
- XU J, WU S D, LIU J, et al. Narrow line-width picosecond erbium-doped fiber lasers passively mode-locked with graphene oxide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 0702002.
- [8] CUI Y, LIU X. Graphene and nanotube mode-locked fiber laser emitting dissipative and conventional solitons [J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18969.
- [9] LUO Z C, LUO A P, XU W C, et al. Tunable multiwavelength passively mode-locked fiber ring laser using intracavity birefringence-induced comb filter [J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(4): 571-577.
- [10] 汪光辉, 王志鹏, 陈宇 等. 基于石墨烯的被动锁模掺铒光纤孤子激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602003.
- WANG G H, WANG ZH P, CHEN Y, et al. Passively graphene mode-locked soliton erbium-doped fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0602003.
- [11] GOING R, POPA D, TORRISI F, et al. 500 fs wideband tunable fiber laser mode-locked by nanotubes [J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2012, 44(6): 1078-1081.
- [12] ZHANG H, TANG D Y, KNIZE R J, et al. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 111112.
- [13] XU H, LEI D, WEN S, et al. Observation of central wavelength dynamics in erbium-doped fiber ring laser [J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7169-7174.
- [14] CHEN W C, LUO Z C, XU W C. The interaction of dual wavelength solitons in fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(11): 816-820.
- [15] YUN L, LIU X, MAO D. Observation of dual-wavelength dissipative solitons in a figure-eight erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2012, 20(19): 20992-20997.
- [16] ZHANG H, TANG D Y, WU X, et al. Multi-wavelength dissipative soliton operation of an erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12692-12697.
- [17] SONG C, XU W, LUO Z, et al. Switchable and tunable dual-wavelength ultrashort pulse generation in a passively mode-locked erbium-doped fiber ring laser [J]. Optics Communications, 2009, 282(22): 4408-4412.

## 作者简介



**孟阔**, 2003 年于河南大学获得学士学位, 2008 年于首都师范大学获得硕士学位, 2011 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学讲师, 主要研究方向为光纤激光器及精密测量等。

E-mail: mengkuo@bistu.edu.cn

**Meng Kuo** received B. Sc. from Henan University in 2003, received M. Sc. from Capital Normal University in 2008, received Ph. D. from University of Chinese Academy of Sciences in 2008, now he is lecturer in Beijing Information Science and Technology University. His main research interest include fiber laser and accurate measurement and so on.



**祝连庆** (通讯作者), 1963 年出生, 现任北京信息科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物医学检测技术与仪器、精密光电测试技术等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

**Zhu Lianqing** (Corresponding author) was born in 1963, Ph. D., graduated in Hefei University of Technology and now is professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include automatic enzyme immunoassay instrument and large gear on-machine measuring system and so on.



娄小平,分别在1991年、1998年于北京航空航天大学获得学士学位和硕士学位,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为光纤传感、光电精密测试技术等。

E-mail: lowxiaoping@bistu.edu.cn

**Lou Xiaoping** received B. Sc. and M. Sc. from Beihang University in 1991 and 1998, respectively. Currently, she is a professor in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include fiber sensing technology and optical measurement technology.



董明利,1989年于合肥工业大学获得硕士学位,2009年于北京理工大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为生物医学检测技术与仪器、视觉测量技术。

E-mail: dongml@sina.com

**Dong Mingli** received M. Sc. from Hefei University of Technology in 1989, and Ph. D. from Beijing Institute of Technology in 2009. Now she is a professor in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include biomedical detection technology and instrument, vision measurement technology.

## 是德科技最新款 64 GBaud BERT 扩展解决方案助力 400G 接收机测试化繁为简,轻松提速

### 新闻要点:

- 新款比特误码率测试仪(BERT)功能更全面,并配有全新的可调均衡器,是 PAM-4 和 NRZ 测试的理想之选
- 高度整合的码型发生器可以显著优化接收机测试设置
- 内置均衡器可以重新打开闭合眼图,获得可重复的结果
- 支持扩展和升级,轻松满足未来需求

是德科技公司(NYSE:KEYS)近日宣布为 M8040A 高性能比特误码率测试仪(BERT)解决方案推出功能更强大的创新选件,用于测试高达 64 GBaud 的 PAM-4 和 NRZ 器件。为实现新兴的 400G 数据中心互连,验证工程师和研发工程师需要对接收机进行物理层表征。简化的测试设置,准确且可重复的结果,将使工程师受益匪浅。

当今的数据中心基础设施仍在不断优化,旨在满足对带宽容量永无止境的追求,以及对降低功耗、扩大覆盖范围和实现服务差异化的要求。以 PAM-4 为代表的器件具有更高的传输速率、更多的传输通道和新型多电平数据格式,可以满足下一代数据中心互连不断增加的传输带宽需求。

最新版本的 IEEE 802.3bs 和 OIF CEI-56G 实施协议针对 PAM-4 和 NRZ 接口做出了定义,使其可用于最大带宽达 400 Gb/s 的高速接口,包括电气芯片间、芯片至模块、背板连接和光接口。研发和验证实验室在表征接收机以实现 PAM-4 或 NRZ 数据速率高达 64 GBaud 的数据中心互连时,面临着新的测试挑战,例如更加紧张的时间裕量、通道损耗、非线性、幅度干扰和串扰效应等,这些问题让测试效率和精度变得至关重要。

克服电气接口(例如芯片间、芯片至模块接口和背板)的通道损耗,是实现更高符号率的一大挑战。在发射机和接收机均衡中使用去加重等预失真技术,有助于重新打开由码间干扰所造成的闭合眼图。

是德科技副总裁兼网络和数据中心解决方案事业部

总经理 Joachim Peerlings 表示:“M8040A 是针对 PAM-4 和 NRZ 信号最完整的接收机测试解决方案。利用其最新内置的均衡功能,我们可以继续优化接收机测试,帮助我们的客户将其解决方案更快推向市场。M8040A 使研发和测试工程师能够得心应手地处理 400G 数据中心互连接收机的测试挑战。”

新型 M8040A 是以 M8000 系列 BER 测试解决方案为基础设计的最新模块化 AXIe 仪器,作为一款高度综合的 BERT,它能够支持高达 64 Gbaud 的 PAM-4 信号和 64 Gb/s 的 NRZ 信号。其码型发生器模块内置有去加重、抖动注入功能,并可以选配第二个通道。工程师和设计人员可以在软件用户界面中选择 PAM-4 和 NRZ 信号,而无需使用外部合路器、连接线缆和执行偏移校正来提供 PAM-4 信号。远程探头前端可以尽量靠近被测器件,以便获得最佳信号质量。分析仪模块可以为长 PRBS 和 QPRBS 码型实时提供真正的 PAM-4 误码分析——即使比特误码率和符号错误率很低,工程师也能进行可靠的验证。

现在,误码分析仪能够支持符号率高达 64 Gbaud 的 NRZ 信号和内置可调均衡功能更为强大,且用户可以通过图形和远程控制界面操控 M8040A。

### 更多信息

如欲了解关于 Keysight M8040A 64 GBaud BERT 的更多信息,请访问: [www.keysight.com/find/m8040a](http://www.keysight.com/find/m8040a)。浏览产品图片,请访问 [www.keysight.com/find/M8040A-images](http://www.keysight.com/find/M8040A-images)。关于加快 PAM-4 和 NRZ 接收机精确表征的信息,请见 Keysight 400G 资源。

