

利用自相关方法实现光脉冲时间延迟精确测量

王 竞, 李建中, 温伟峰, 陈光华, 彭其先, 陶世兴*

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 光电子研究室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了满足在高精度波分复用/时分复用光采样系统中, 采样光脉冲时间抖动低于 100 fs 的要求, 开发了一套基于自相关法测量时间延迟的系统。通过光纤耦合器连接一路参考光路将光脉冲在时域上进行“复制”, 并使初始光脉冲和“复制”光脉冲相关, 得到参考光路和被测光路的精确光程差, 进而固定参考光路并接入不同被测光路从而得到多路被测光路之间相对延时。实验结果表明, 利用自相关法测量脉冲时间间隔精度优于 50 fs, 满足波分复用/时分复用光采样系统研究需要。

关键词: 光采样; 时间抖动; 时间延迟; 自相关仪

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150802.0270

Precisely measuring for optical pulse time delay using autocorrelation

WANG Jing, LI Jian-zhong, WEN Wei-feng, CHEN Guang-hua, PENG Qi-xian, TAO Shi-xing*

(*Photoelectronics Laboratory, Institute of Fluid Physics, China Academy of
Engineering Physics, Mianyang 621900; China*)

* *Corresponding author, E-mail: taoshixing109@163.com*

Abstract: In order to fulfill the requirement that optical sampling pulse time jitter is less than 100 femtosecond in the high precision WDM/OTDM optical sampling system, a system using the autocorrelator to measure the time delay is developed. By a fiber coupler connecting a reference optical path to copy the optical pulse, the initialized optical pulse is correlated with the copied pulse to get the time delay between measured optical path and the reference optical path, and then to get the relatively time delay between the measured optical paths. The experiment result indicates that the precision of the autocorrelation method is better than 50 femtosecond, which can satisfy the research requirements of the WDM/OTDM system.

Key words: optical sampling; time jitter; time delay; autocorrelator

1 引言

光采样示波器是突破纯电示波器电子学“瓶颈”的有效手段之一,基于光子学高速、高带宽、低功耗的特点,光采样示波器可以达到很高的带宽和采样率。目前光采样示波器主要有色散啁啾^[1-2]、时间拉伸^[3-6]、波分复用/时分复用^[7-12]几种类型,上述方案在结构和精度方面各有优缺点,其中色散啁啾方案结构相对简单,但需要严格匹配色散效应,时间拉伸方案对后端电处理要求不高,但色散效应对采样性能影响较为严重,波分复用/时分复用方案原理相对较为成熟^[13-18]。而对于采样光脉冲时间延迟测量,目前比较直观方法是将光脉冲转换为电脉冲在电域进行测量,测量仪器包括示波器,网络分析仪,频谱分析仪等。由于电子学速率及背景噪声的影响,其进行延时测量精度在皮秒及亚皮秒量级左右(网络分析仪可以达到 100 fs 左右,高端示波器可达 200 fs 左右),不能满足测试需求。

纯光学测量方法可以避免电子学抖动带来的测量精度限制。基于光谱相位相干直接电场重构法(SPIDER)的频谱分辨光开关(FROG)主要用于测量脉冲波形等参数,而光脉冲传输时间测量则是通过光时域反射法(OTDR)、光频域反射法(OFR)等测量光程长度进而反推得到时间参数。在对飞秒、皮秒光脉冲的诊断中,自相关法主要用于对脉冲宽度测量^[19],以德国 Pulse Check 自相关仪为例^[20],其采用迈克尔逊干涉结构,将入射光分为两路,一路固定光程,另一路相对于此路光程差连续改变,当两路光程差为零时,得到自相关信号最强。目前自相关仪技术发展非常成熟,测试精度能达到 10 fs 左右。

2 波分复用/时分复用系统

本文设计了基于 250 MHz 超连续谱激光器经过 16 路波分复用和 5 级时分复用对光脉冲倍频达到 128 G 光采样率,精度优于 5 bit 的光采样系统,如图 1 所示。该方案的优点在于:通过光采

样可以得到很高的采样率,之后经过电子学多路量化拼接,有效地降低了对电量化时钟时间抖动的要求。与电子学直接量化一样,光采样精度主要受限于采样光脉冲时间抖动和幅度抖动,在外界环境稳定情况下,时间抖动主要来源于延迟误差,光脉冲延迟控制采用可调光纤延迟线(VDL)^[21-22],其延迟精度优于 30 fs。由于波分复用系统相邻通道对应不同的光谱成分,因此相邻通道光脉冲不会产生自相关信号,我们设计了一套包括固定长度的参考光纤,采用自相关仪实时测量脉冲延时装置,理论和实验表明,该装置延迟测试精度优于 50 fs,相对于电学方法其精度提高 20 倍,满足波分复用/时分复用光采样时间延迟测量需求。

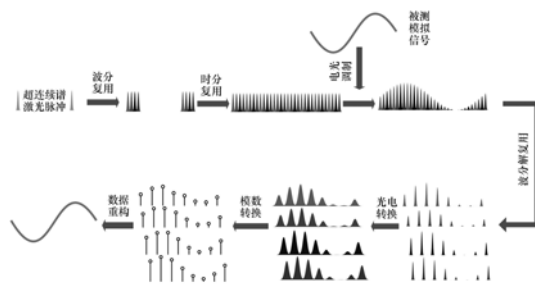


图1 波分复用/时分复用光采样系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the WDM/OTDM optical sampling system

3 时间延迟测量

系统测试结构如图 2 所示,波分复用系统包含密集波分复用器(DWDM2)以及 16 路光路,每路光路包含可调光纤延迟线(VDL),光纤衰减器(VOA)及法拉第旋转镜(FRM),相邻两路之间延迟 7.8125 ps,结构图中还包括与 DWDM2 相同参数的 DWDM1,三端口环形器(CIR),分光比 70:30 的 1×2 光纤耦合器,掺铒光纤放大器以及自相关仪。测量过程中固定参考光路,分别接入波分复用系统不同被测路,检测被测路与参考路之间光程差,进而得到波分复用系统各路之间时延。其中 DWDM1 主要用于光谱分割,使得经过光纤耦合器输入参考路和被测路脉冲光谱相同,从而产

生自相关信号;VDL 用于精确调节两路间延迟;VOA 用于保持各路功率一致;FRM 为保偏器件,使得合束有相同偏振态,使系统对偏振不敏感。整个测试系统光功率损耗约为 10 dB 左右,而自相关仪产生二倍频信号要求输入光功率大于 5 mW,被测试光脉冲串经 CIR 端口 3 输出之后,经过 EDFA 放大进入自相关仪,从而得到自相关信号。

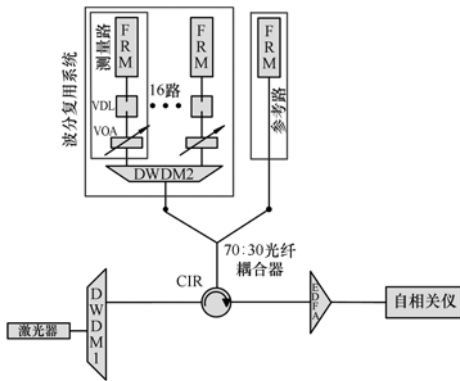


图 2 测试光路结构图

Fig. 2 Configuration of the measuring optical path

激光器输出脉冲周期为 4 ns,而自相关仪量程为 160 ps,若将激光器输出脉冲直接输入自相关仪,则只有一个自相关峰。通过脉冲复制,使得输出激光 4 ns 周期内出现多个间隔小于 80 ps 的光脉冲,则在自相关仪可动臂光程改变一个周期内能够出现到多个自相关峰。具体产生过程如图 3,宽谱激光器输出脉冲经过 DWDM1 滤波之后经由 CIR 和光纤耦合器分为光谱成分相同的参考路 A 和测量路 B,两路经过 FRM 返回之后合束形成 C 路,两路之间光程差即为 C 路中脉冲间隔 $\Delta\tau$,首先经过示波器观测增加或减少一段光纤对两路光程差进行初步控制使两路光程差即 $\Delta\tau < 80$ ps,之后 C 路经过 EDFA 功率放大之后进入自相关仪。

在可动臂光程改变过程中,当可动臂与固定臂光程差 $\Delta t = \Delta\tau, 0, -\Delta\tau$ 时,都会出现自相关峰,且 $\Delta t = 0$ 时,相关光脉冲个数为 $\Delta t = \pm \Delta\tau$ 时脉冲个数两倍,自相关信号强度为其两倍,分别对应图 2 中的 D1, D2, D3 三种情况。据此类推,若自相关一半量程内有 K 个相同光脉冲,则观测到

自相关峰个数为 $2K - 1$,若光脉冲强度相等,则自相关峰强度比值为:

$$\frac{1}{K} : \frac{2}{K} : \dots : \frac{K-1}{K} : 1 : \frac{K-1}{K} : \dots : \frac{2}{K} : \frac{1}{K}, \quad (1)$$

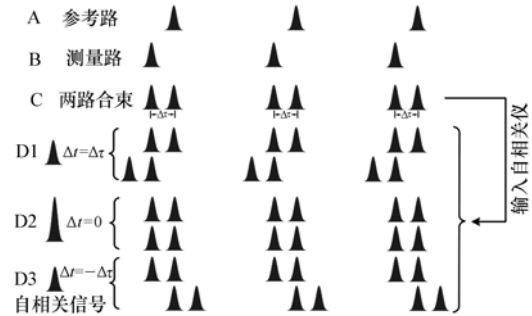


图 3 多个自相关峰产生过程

Fig. 3 Forming process of multiple autocorrelation peaks

4 实 验

在固定参考光路情况下,通过可调光纤延迟线改变测量路光程,自相关仪中出现 3 个自相关峰,且相对于零位置左右对称,如图 4 所示,左右两自相关峰与中心自相关峰相对位置 $\Delta\tau$ 即为参考路与测量路延迟时间。

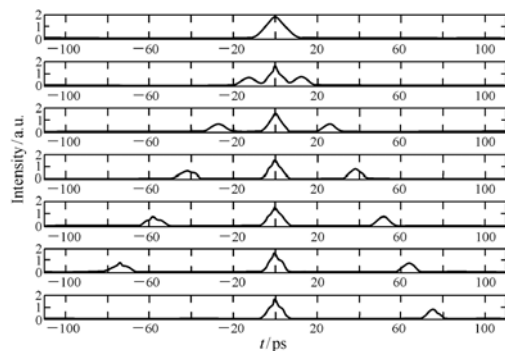


图 4 自相关峰相对位置随着参考路与测量路光程差发生变化

Fig. 4 Relative position changes of the autocorrelation peaks with the optical path difference between the reference optical path and the measuring optical path

通过对短时间内多组测量数据平滑拟合,得

到3个自相关峰两两时间间隔,记为 T_1 、 T_2 、 T_3 (单位:fs),其中 T_1 为左边自相关峰与中心自相关峰时间间隔, T_2 为右边自相关峰与中心峰时间间隔, T_3 为 T_1 、 T_2 取平均所得,如表1所示,3组数据的标准偏差分别为83.7、86.7、46.9 fs。

表1 实验数据

Tab.1 Experiment data (fs)

T_1	T_2	T_3
66.380	66.720	66.550
66.420	66.640	66.530
66.460	66.570	66.515
66.520	66.590	66.555
66.670	66.570	66.620
66.520	66.710	66.615
66.450	66.790	66.620
66.540	66.680	66.610
66.500	66.790	66.645

5 结果与讨论

由表1中得出, T_1 和 T_2 取平均后的 T_3 标准偏差最小。分析认为,自相关峰的时间抖动主要来源于自相关仪多个扫描周期时可动臂的移动抖动误差。而在自相关仪光程差变化的一个扫描周期内,自相关的发生将同步滞后或超前,反映在左右自相关峰的移动将具有相同的趋势。经过取平均,可减少或近似消除这种误差,使结果准确。经计算 T_3 也确实具有最小的偏差值,我们取 T_3 为实际的延时时间。

自相关仪光程差变化 $\Delta l(\theta)$ 与可动臂的旋转角 θ 有如下关系^[20]:

$$\Delta l(\theta) = 4R[\sin 2\psi \sin \theta - (1 - \cos 2\psi)(1 - \cos \theta)], \quad (2)$$

式中, ψ 为旋转镜方位角。

在 θ 极小时,式(2)可近似为:

$$\Delta l(\theta) = 4R\theta \sin 2\psi, \quad (3)$$

即光程差与旋转角可以近似为线性关系。可动臂光程差线性变化,因此测量误差主要来源于系统随机噪声,激光器抖动^[23],以及自相关曲线拟合

误差。

另外,测量值的抖动除噪声影响外^[24],主要来源于环境影响。在测量精度达到fs量级时,环境温度变化导致的光纤折射率变化会使自相关峰有明显抖动^[25]。由于环境温度变化不可预知并难以测量,下面只对其影响范围进行粗略估算。

单模光纤的折射率温度系数在波长1550 nm处为 $0.811 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,其折射率为 $n_{1310} = 1.4676$, $n_{1550} = 1.4682$ 。

对式(4)

$$v = c/n, \quad (4)$$

进行微分,有

$$\Delta v = (c/n^2) \cdot \Delta n. \quad (5)$$

同样对式(6)

$$l = v \cdot t, \quad (6)$$

进行微分,有:

$$\Delta t = (t/v) \cdot \Delta v, \quad (7)$$

式中, v 为光在光纤中的传播速度; c 为光在真空中的速度; n 为光纤折射率; l 为光纤长度; t 为传播时间。

假定环境温度抖动为 $\pm 1^\circ\text{C}$ (温度控制器精度 $\pm 1^\circ\text{C}$),波分复用系统中光纤长度为2.5 m,则经计算,时间抖动 $\Delta t = \pm 67$ fs。这与本文的测量结果大致吻合。

6 结 论

针对采用高带宽示波器或者网络分析仪等电子设备测量时间延迟只能到皮秒及亚皮秒的时间精度限制,开发了一套基于自相关法的精密光学延迟测量系统,利用外加的参考光路对被测光脉冲进行“复制”,进而通过自相关仪使得初始光脉冲与“复制”光脉冲相关,所得到相邻自相关峰间隔时间即为参考光路与被测光路光程差,以参考光路为基准,得到多路被测光路与参考光路之间光程差,进而得到多路光路之间光程差。根据实验结果计算,其延迟测量精度优于50 fs,相对于电子学方法的测量精度,其精度成倍提高。另外该方法可直接应用于脉冲周期小于自相关仪一半量程的激光脉冲时间抖动测量,将激光器直接接

入自相关仪中,通过观测自相关峰相对时间位置变化即可以得到脉冲时间抖动,有效解决频谱分析仪只能通过积分计算一定频率范围内的时间抖动问题。

参考文献:

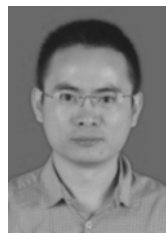
- [1] TAKAHASHI K, MATSUI H, NAGASHIMA T, *et al.*. Resolution upgrade toward 6-bit optical quantization using power-to-wavelength conversion for photonic analog-to-digital conversion[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22):4864-4867.
- [2] K RTNER F X, AMATYA R, ARAGHCHINI M, *et al.*. Photonic analog-to-digital conversion with electronic-photonic integrated circuits[J]. *SPIE*, 2008, 6898:1-15.
- [3] BHUSHAN A S, COPPINGER F, JALALI B, *et al.*. 150 Gsample/s wavelength division sampler with time-stretched output[J]. *Electronics Letters*, 1999, 34(5):474-475.
- [4] NG W, ROCKWOOD T D, SEHER G A, *et al.*. Demonstration of a large stretch-ratio ($M = 41$) photonic analog-to-digital converter with 8 ENOB for an input signal bandwidth of 10 GHz[J]. *IEEE*, 2012, 24(14):1185-1187.
- [5] FARD A M, BUCKLEY B, ZLATANOVIC S, *et al.*. All-optical time-stretch digitizer[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5):051113-1-051113-5.
- [6] GUPTAA S, JALALI B. Time stretch enhanced recording oscilloscope[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(4):041105-1-041105-3.
- [7] COPPINGER F, BHUSHAN A S, JALALI B. 12 Gsample/s wavelength division sampling analogue-to-digital converter[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4):316-317.
- [8] RABIEI P, LEVI A F J. Analysis of hybrid optoelectronic WDM ADC[J]. *J. Lightwave Technology*, 2000, 18(9):1264-1270.
- [9] KANG J U, ESMAN R D. Demonstration of time interweaved photonic four-channel WDM sampler for hybrid analogue-digital converter[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(1):60-61.
- [10] FRANKEL M Y, KANG J U, ESMAN R D. High-performance photonic analogue-digital converter[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(25):2096-2097.
- [11] BHUSHAN A S, COPPINGER F, YEGNANARAYANAN S, *et al.*. Nondispersive wavelength-division sampling[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(11):738-740.
- [12] CLARK T R, KANG J U, ESMAN R D. Performance of a time- and wavelength-interleaved photonic sampler for analog digital conversion[J]. *IEEE*, 1999, 11(9):1168-1170.
- [13] 杨彦甫, 姜采云, 赵晓凡, 等. 利用非线性光纤环境 160 Gb/s 到 10 Gb/s 解时分复用[J]. *光学学报*, 2009, 29(3):611-616.
YANG Y P, LOU C Y, ZHAO X F, *et al.*. Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3):611-616. (in Chinese)
- [14] 谭震宇, 张峰, 陈长鸣, 等. 650 nm 聚合物阵列波导光栅波分复用器设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(1):71-76.
TAN ZH Y, ZHANG F, CHEN C M, *et al.*. Design of wavelength division multiplexer of polymer arrayed waveguide grating at 650 nm[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):71-76. (in Chinese)
- [15] 陈小刚, 黄德修, 元秀华, 等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码分复用系统[J]. *中国激光*, 2008, 35(1):77-81.
CHEN X G, HUANG D X, YUAN X H, *et al.*. Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(1):77-81. (in Chinese)
- [16] 池剑锋, 李唐军, 贾楠, 等. 高精度色散管理实现 160 Gb/s 光时分复用信号 100 km 稳定无误码传输[J]. *中国激光*, 2011, 38(1):120-125.
CHI J F, LI T J, JIA N, *et al.*. High-precision chromatic dispersion management completes 160 Gb/s OTDM signal 100-km stable error-free transmission[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(1):120-125. (in Chinese)

- [17] 贾锡学,李岩,孔德明,等. OTDM 系统时钟提取和解复用研究[J]. 光通信研究,2013,02:15-18.
JIA X X, LI Y, KONG D M, *et al.*. Research on clock recovery and demultiplexing of OTDM[J]. *Study on Optical Communications*, 2013, 02: 15-18. (in Chinese)
- [18] 王建军,许党朋,林宏奂,等. 基于时分复用技术的甚多束光脉冲产生系统[J]. 物理学报,2010,59(12):8725-8732.
WANG J J, XU D P, LIN H H, *et al.*. Multibeam optical pulse generation system based on time division multiplexing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8725-8732. (in Chinese)
- [19] 吴建光,张正泉. 超快飞秒脉冲激光测量技术研究[J]. 光学精密工程,1996,4(5):10-13.
WU J G, ZHANG ZH Q. Ultrafast femtosecond pulses laser measurement technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(5): 10-13. (in Chinese)
- [20] YASA Z A, AMER N M. A rapid-scanning autocorrelation scheme for continuous monitoring of picosecond laser pulses [J]. *Optics Communications*, 1981, 36(5): 406-408.
- [21] 赵新才,陶世兴,刘宁文,等. 精密光纤延迟线设计及实验验证[J]. 光学精密工程,已录用
ZHAO X C, TAO SH X, LIU N W, *et al.*. Precision optical fiber delay line design and experimental verification[J]. *Opt. Precision Eng.* (in Chinese). (in press)
- [22] 李浩,宋玲玲,张立钧,等. 4通道交叉型二氧化硅光波导延迟线阵列的设计与制备[J]. 中国光学,2014,7(3):435-441.
LI H, SONG L L, ZHANG L J, *et al.*. Design and fabrication of 4 channels silica cross optical waveguide delay line array [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 435-441. (in Chinese)
- [23] 靳刚,温馨,杨保东,等. 采用声光频移器反馈控制实现激光强度稳定[J]. 中国光学,2014,7(2):234-239.
JIN G, WEN X, YANG B D, *et al.*. Laser intensity stabilization by using of opto-electronic feedback control based on an acousto-optical frequency-shifting system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 234-239. (in Chinese)
- [24] 周海军,王文哲,郑耀辉. 高增益散粒噪声探测器的性能改进[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2737-2743.
ZHOU H J, WANG W Z, ZHENG Y H. Improvement of high-gain shot-noise detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2737-2743. (in Chinese)
- [25] 童峥嵘,郭阳,杨秀峰,等. 基于多模-单模-多模结构和光纤布拉格光栅同时测量温度和折射率[J]. 光学精密工程,2012,20(5):921-926.
TONG ZH R, GUO Y, YANG X F, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on MSM structure combined with FBG[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 921-926. (in Chinese)

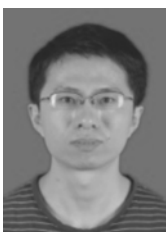
作者简介:



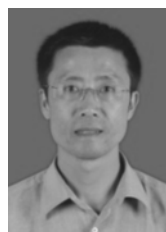
王 竞(1989—),男,湖北十堰人,硕士研究生,2012年于浙江大学获得学士学位,主要从事光电子方面的研究。E-mail:yk47wj@163.com



陈光华(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事激光干涉测量技术方面的研究。E-mail:chen-guanghua@sina.com



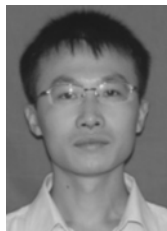
李建中(1982—),男,2008年于电子科技大学获得硕士学位,主要研究光纤传感、信号处理、光纤激光器等方面的研究。E-mail:jianzhong265@163.com



彭其先(1970—),男,研究员,主要从事光电技术方面的研究。E-mail:qxpeng@126.com



温伟峰(1982—),男,硕士,副研究员,主要从事光电检测技术与系统方面的研究。E-mail:pleague@126.com



陶世兴(1983—),男,博士,助理研究员,2006年于国防科技大学获得学士学位,2011年于中国科学院上海应用物理研究所获得博士学位,主要从事光信息方面的研究。E-mail:taoshixing109@163.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新能力,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50元/期

网址:www.yjyxs.com