

乌氏干涉测量的信息读取

张景和,张顺国,董跃华

(哈尔滨工业大学 机电工程学院 精密工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对乌氏干涉仪条纹信号调整难、用肉眼读数难等问题,提出将 He-Ne 激光作为乌氏干涉仪光源的设计,得到了高质量的干涉条纹信号,并采用光电转换方法将条纹移动信号转变为电信号实现了微位移的高精度测量。设计了光电信号检测电路,利用双门限整形电路标定出整形方波,克服了干涉信号在设定比较值附近抖动引起误处理的缺点;提出了辨向细分电路,在 1 路干涉条纹信号下,提取了具有正交性的 2 路电子信号,实现了干涉条纹的移动辨向与信号细分。按此方案设计并搭建了一套激光干涉检测实验装置,用 2 个计量差值为 5 μm 的标准量块,对激光干涉检测装置进行了标定,在电路为 4 细分的情况下,该装置测量分辨率达 79 nm;解决了乌氏干涉仪自动读数的问题,提高了乌氏干涉仪的测量精度和准确性。

关键词:乌氏干涉仪;激光干涉;信号处理;双门限整形;辨向细分

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A

Information reading of Ubbelohde interferometry

ZHANG Jing-he, ZHANG Shun-guo, DONG Yue-hua

(Center for Precision Engineering, School of Mechatronics Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: For the shortcomings of the interference fringe difficult to read and adjust in an Ubbelohde interferometer, a He-Ne laser was used in the Ubbelohde interferometer as the source to offer interference fringe signals with high quality. Then, the fringe signals were transform into electron signals to implement the micro-displacement measurement precisely. A detection circuit was designed and the square wave signal was extracted by using a dual-threshold shaping circuit, which solveed the error processing problem when signals jittered near the set comparison value. A discerning direction and subdividing circuit was designed and the orthogonal electron signals were extracted to achieve the discerning direction of interference fringe movement and the subdivision of interference signals. On the schemes above, a laser interference detection device was designed and built. The device was calibrated by two standard gauge blocks with a difference value of 5 μm . Under four subdividing circuits, the resolution of the detecting device is 79 nm. Therefore, the Ubbelohde interferometer

收稿日期:2010-09-02;修订日期:2010-11-23

基金项目:国家十五攻关项目(No. 41318.2.12)

achieved automatic reading and improves its measurement precision.

Key words: Ubbelohde interferometer; laser interference; signal processing; dual-threshold shaping; discerning direction and subdividing

1 引言

高精度位移检测系统是在机械、仪表、工具、兵器、宇航等产业和研究领域获得高位置精度的基础,也是上述领域产品及技术不断进步的制约因素。随着科学技术的不断推进,近代机械工业尤其是当代超精密加工技术、微纳米技术、微机电系统的兴起与发展对长度量的检测提出了越来越高的要求,不仅要求测量分辨率从微米级上升到亚微米级甚至纳米级,同时要求测量范围达到1~100 mm,甚至更大^[1,2]。现阶段,能实现高精度测量的仪器种类较多,但大多数只能满足高精度的检测要求,测量范围较小,能同时满足高精度与大测量范围要求的仅有激光干涉仪和光栅位移测量仪器,而采用激光干涉仪进行检测,还可以将其量值直接溯源到激光波长,从而便于统一科研、工业技术中各种纳米尺度量值的溯源,具有十分重要的意义^[3,4]。

本文对乌氏干涉仪光源进行了改造,并采用计算机自动读数与数据处理的方法提高了乌氏干涉仪的测量精度和微测量量程,扩大了乌氏干涉仪的应用范围。本文的工作对相关白光干涉仪的改进具有借鉴意义。

2 激光应用于乌氏干涉仪

乌氏干涉仪,即白光干涉仪,其工作原理与单频激光干涉仪工作原理类似,不同的是乌氏干涉仪使用的光源不是激光,而是低相干的白光光源,产生的干涉条纹为彩色,干涉图样中存在一个与波长无关的中心条纹。测量原理如图1所示,在检测位移变化时,测头带动反射镜来回移动,产生的干涉条纹也随之移动。位移每变化半个光源波长 $\lambda/2$ 时,干涉条纹便产生一个周期的明暗变化,干涉条纹变化的周期数 N 与被测位移 L 有如

下关系:

$$L = \frac{N}{2}\lambda. \quad (1)$$

式(1)表明,若能记录干涉条纹变化的周期数 N ,即可测出被测长度。在实际测量中,需要人眼判读中心条纹位置的移动量来实现计量。这种通过人眼对干涉条纹移动量的判读,引入了较大的读数误差^[5]。

另一方面,能否观察到干涉条纹还要取决于光源的相干长度^[6]:

$$L_c = (\lambda^2 - \frac{\Delta\lambda^2}{4})/\Delta\lambda, \quad (2)$$

式中 λ 为光源的中心波长, $\Delta\lambda$ 为谱线宽度,当 $\Delta\lambda \ll \lambda$ 时,有:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (3)$$

由此可知光的单色性越好,即 $\Delta\lambda$ 越小,相干长度 L_c 越大。

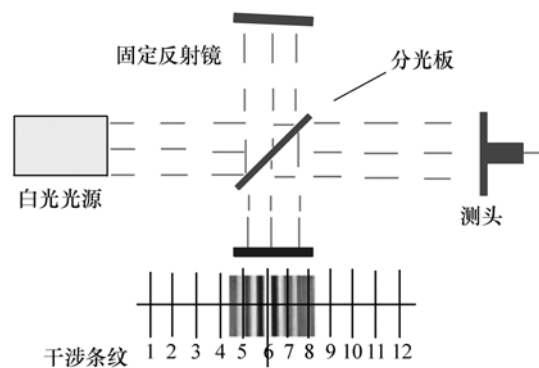


图1 乌氏干涉仪测量原理图

Fig. 1 Measurement principle of Ubbelohde interferometer

白光单色性差,相干长度仅为几微米至几百微米^[7],因此其测量范围受到较大限制;而且其干涉图样仅在两臂光束光程差接近零时才能发生干涉,调整出干涉图样较为困难。

综上所述,乌氏干涉仪具有不易判读、量程

小、不易调试等缺点。激光具有能量集中、方向性和相干性好、能如实地负载物体光波信息等特性。基于激光的高相干性,以激光作光源的检测仪器,测量范围可达1 m以上,且干涉条纹明暗对比度高,易于调试。目前,激光干涉仪不仅能测量线位移、线速度,还能测量小角度以及各种形位误差等几何量^[8]。

考虑激光测量的优势,本文改换激光作为乌氏干涉仪的干涉光源,以移植激光干涉测量的优点,同时采用光电转换信号处理判读方法,将条纹移动时的光强变化转化为电信号,经过信号处理提取移动信息,实现位移的高精度测量,如图2所示。

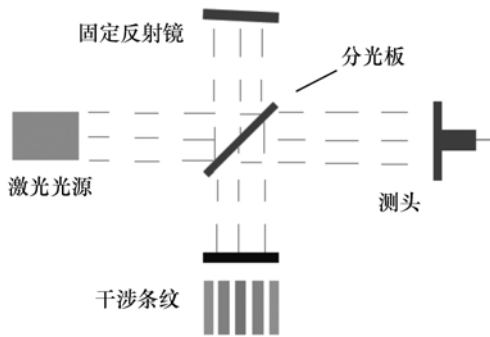


图2 激光干涉仪测量原理图

Fig.2 Measurement principle of laser interferometer

3 干涉信号的提取

采用光电转换信号处理判读方法,需要从干涉条纹中提取出干涉信号,并设计辨向电路以判别干涉条纹的移动方向,实现精确测量。一般要求从干涉条纹中提取出2路干涉信号近似正交来实现辨向电路功能,而这正是本文讨论的判读方法的难点之一。目前,干涉信号常用的提取方法是采用分光镜、光栅等分光元件将干涉条纹分解成相位差为 $\pi/2$ 的几路条纹,再用光电器件接收、转化并合成2路相位差为 $\pi/2$ 的干涉信号。

本文提出的方法是直接采用2个光敏二极管1,2相差1/4条纹周期排布,如图3所示。当干涉条纹移动时,两光电器件接受条纹光强周期性的变化,分别形成近似正弦的信号 I_1 和 I_2 ,干涉条

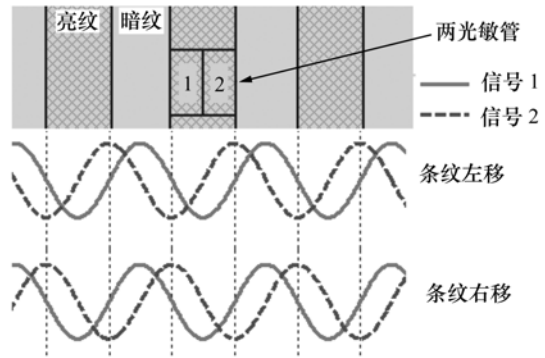


图3 两路正交干涉信号的提取

Fig.3 Extraction to two orthogonal interference signals

纹左移时,信号 I_1 相对信号 I_2 刚好滞后 $\pi/2$;而当干涉条纹右移时,信号 I_1 相对信号 I_2 刚好超前 $\pi/2$,根据这2路干涉信号相位的超前/滞后,即可判断干涉条纹的移动方向。

4 双门限整形电路

为了提高信号的信噪比,采用了灵敏度较高的硅光敏二极管作光电转换器件,采用低噪声器件设计前置放大电路对光电信号进行放大,同时选用一阶Butterworth低通滤波器来滤除噪声,最终提取得到的干涉信号,如图4所示。

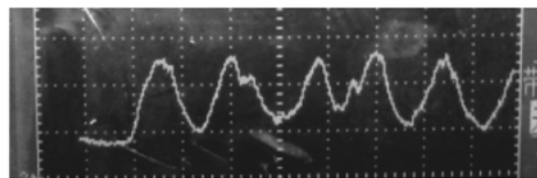
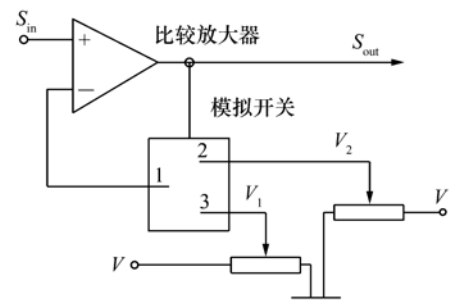


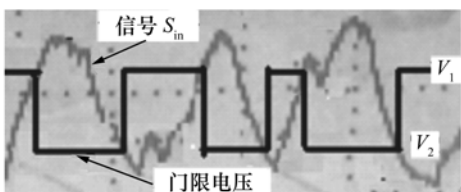
图4 滤波后输出的干涉信号

Fig.4 Interference signal after filtering

由于电路器件非理想,滤波输出的信号仍含有少量噪声,见图4。为了便于后续电路的处理,需要将得到的信号整形为方波。若直接采用常规比较器整形为方波,信号在设定比较电压值附近抖动时,输出的方波信号也会随之抖动,从而造成后续电路的误处理。为解决该问题,本文设计了一种双门限整形电路,如图5所示。



(a) 双门限电路示意图
(a) Schematic diagram of dual threshold circuit



(b) 整形电路波形图
(b) Waveform diagram of shaping circuit

图5 双门限整形电路
Fig.5 Dual threshold circuit

设定了2个比较电压,当干涉信号幅值上升刚过初始比较电压时,输出信号电平高低发生变化,控制模拟开关选通另一电压较低的比较电压,使干涉信号在此处抖动不影响输出信号,直到干涉信号下降至刚低于比较电压时,输出信号电平才会变动。依此循环,就可以直接从带噪声的信号波中整形出所需要的方波,最终整形得到的两路正交干涉信号,如图6所示。

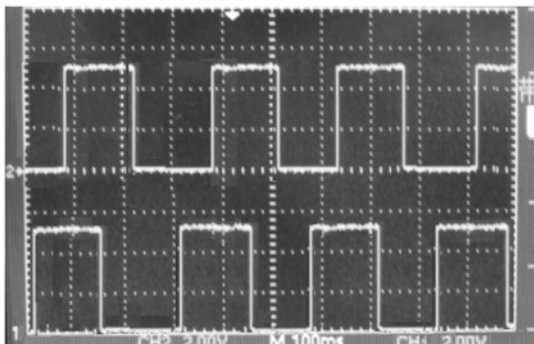


图6 整形输出的两路正交干涉信号
Fig.6 Two orthogonal interference signals after shaping

5 辨向细分电路

对干涉条纹移动方向进行判别,是实现精确测量的必要条件。本文采用微分型基本辨向电路,实现了干涉条纹移动方向的精准判别,如图7所示。

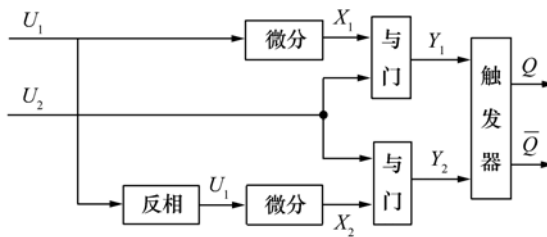


图7 微分型基本辨向电路
Fig.7 Differential-type of basic discerning circuit

当条纹正向移动时, U_1 比 U_2 超前 90° ,只有信号 Y_1 有计数脉冲, Y_2 为低电平,触发器置1;当条纹反向移动时, U_1 比 U_2 滞后 90° ,只有信号 Y_2 有计数脉冲, Y_1 为低电平,触发器复位输出为0。由此即可以以触发器的输出作为辨向信号,实现对干涉条纹移动方向的辨别^[9]。

基本辨向电路不对干涉信号进行细分,只能在条纹移动相位变化大于 π 弧度时判向,而且得到的辨向信号总是滞后于条纹的移动^[10,11]。为了提高测量分辨率,本文还通过对2路方波在一

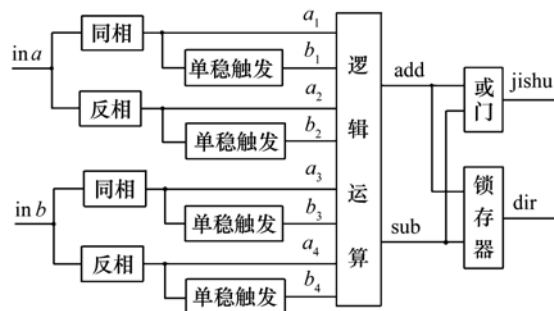


图8 4细分辨向电路原理图
Fig.8 Principle diagram of 4 subdivision and discerning circuit

个周期内的2个上升沿和2个下降沿的处理,实现了对干涉信号的4细分^[12,13],设计的4细分辨向电路如图8所示。

整形得到2列方波信号 ina 和 inb ,经过同向与反向输出得到4路信号 a_1, a_2, a_3 和 a_4 ,这4路信号再经过单稳触发器提取得到 b_1, b_2, b_3 和 b_4 ,即为2路方波信号在信号的上升沿处与下降沿处的4个触发脉冲。然后对这8路信号进行逻辑运算,得到正向计数信号 add 和反向计数信号 sub :

$$add = a_1b_3 + a_2b_4 + a_3b_2 + a_4b_1, \quad (4)$$

$$sub = a_1b_4 + a_2b_3 + a_3b_1 + a_4b_2. \quad (5)$$

最后将正反向计数信号经过锁存器就可以得到辨向信号 dir ,正反向计数信号输入到或门就得到计数脉冲 $jishu$ 。

由图9可知,在1个信号周期内,无论在条纹正向移动还是反向移动时,干涉信号每变化1个周期,都有4个计数脉冲输出,实现了对干涉信号的4细分;在条纹正向移动时, dir 始终输出高电平,在条纹反向移动时,则始终输出低电平,通过判断信号 dir 电平高低,就可以判别条纹移动方向,实现辨向功能。

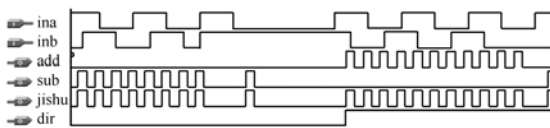


图9 4细分辨向电路 EDA 仿真图

Fig.9 EDA simulation map of 4 subdivision and discerning circuit

最后设计了可逆计数器,根据辨向信号电平高低,将条纹移动时产生的计数脉冲个数累加/减计入,即可实现计数。

6 系统标定实验

标定实验的基本思想是:选择一个标准量块,用本检测装置进行测量,理论上,测量值应该与标准量块的实际值相符。

如图10所示,采用基本辨向电路进行标定实验,乌氏干涉仪通过固定架固定在平台上,其测头

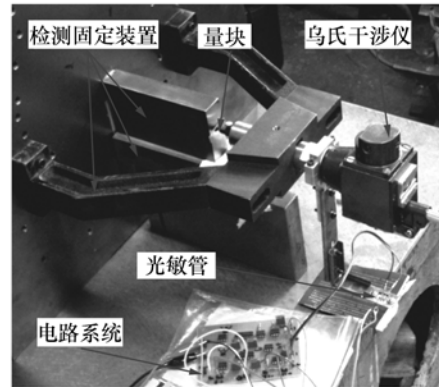


图10 标定实验实物图

Fig.10 Physical map of calibration experiment

顶在标准量块上,移动平台,分别使干涉仪的测头顶在2量块上测量,2标准量块(编号分别为1006和1001)厚度相差 $5 \mu\text{m}$,则测量差值应为 $5 \mu\text{m}$,同时记录下干涉条纹移动输出的计数脉冲差量,依此重复20次测量,记录下对应的脉冲差量数据如表1所示。

表1 标定实验数据

Tab.1 Calibration experimental data

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
差量	15	14	16	17	18	17	15	16	15	18
次数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
差量	14	15	16	14	16	18	14	17	15	14

根据光干涉原理,干涉条纹的明暗条纹程周期性变化,若光源波长为 λ ,相邻的明(暗)条纹对应的实际位移(条纹当量)为 L_0 ,则有:

$$L_0 = \lambda/2n\sin\beta, \quad (6)$$

式中, n 为光束在空气中的折射率,取 $n=1$, β 为干涉仪两镜片的夹角, $\beta=30^\circ$,采用 He-Ne 激光,其波长为 $\lambda=632.8 \text{ nm}=0.6328 \mu\text{m}$,则理论上1个条纹当量为:

$$L_0 = \lambda/2 = 0.316 \mu\text{m}. \quad (7)$$

标定实验中采用基本辨向电路,位移变化1个条纹当量,恰好发出1个计数脉冲,则取理论条纹当量值计算,实际每次标定测量的位移值如表2所示。

表2 标定实验位移数据
Tab.2 Displacement data of
calibration experiment (μm)

位移	4.7	4.4	5.1	5.4	5.7	5.4	4.7	5.1	4.7	5.7
数据	4.4	4.7	5.1	4.4	5.1	5.7	4.4	5.4	4.7	4.4

20次标定测量的位移平均值为 $4.967\ \mu\text{m}$, 单次测量中的最大误差为 $0.6\ \mu\text{m}$, 标定实验位移数据结果与实际情况相近, 表明检测装置的测量结果可靠。

若采用4细分辨向电路进行测量, 其在位移变化1个条纹当量时, 发出4个计数脉冲, 理论测量分辨力为:

$$\delta_4 = L_0/4 \approx 0.079\ \mu\text{m} = 79\ \text{nm}. \quad (8)$$

此外, 由激光干涉测量原理可知, 在乌氏干涉仪的量程内时, 干涉条纹会随位移变化而移动, 可

利用改造的检测装置进行测量。

7 结 论

本文用激光作为乌氏干涉仪的光源, 移植了激光干涉测量的优点, 同时采用光电器件将干涉条纹光强变化量转化为电信号变化量, 用信号处理电路提取出条纹的移动方向、移动条纹数等信息来实现精密测量。按此方案设计并搭建了干涉检测装置, 通过标定实验测出分辨率可达 $79\ \text{nm}$, 验证了检测结果的可靠性。本文设计的检测装置的不足在于分辨率仍较低, 下一步工作需要进一步研究干涉信号的细分; 另外, 检测装置存在信号三差、测量环境误差等系统误差^[12], 亦需要分析系统误差来源及其引入的不确定度, 对测量结果进行修正。

参考文献:

- [1] 苏绍琛. 大量程纳米级光栅位移测量理论及关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
SU SH J. The theory and key technology of the large range of nano-grating displacement measurement[D]. *Changsha: National University of Defense Technology*, 2001. (in Chinese)
- [2] TOLLES W M. Nanoscience and nanotechnology in Europe[J]. *Nanotechnology*, 1996, (7): 59-105.
- [3] 高宏堂. 2.5维大范围纳米激光干涉测长信号处理子系统的研究[D]. 北京: 中国计量科学研究院, 2005.
GAO H T. The study of 2.5-dimensional large-scale laser interferometer measuring signal processing subsystem[D]. *Beijing: National Institute of Metrology P. R. China*, 2005. (in Chinese)
- [4] 宋浩. 高精度大量程位移测量与校准器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
SONG H. The study of large range and high-precision displacement measurement and calibration devices[D]. *Wuhan: Huazhong University of Science and Technology*, 2007. (in Chinese)
- [5] SUN CH S, YU L CH, SUN Y X, et al.. Scanning white-light interferometer for measurement of the thickness of a transparent oil film on water[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44: 5202-5205.
- [6] 夏豪杰. 高精度二维平面光栅测量系统及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
XIA H J. High-precision of two-dimensional grating measurement system and key technologies[D]. *Hefei: Hefei University of Technology*, 2006. (in Chinese)
- [7] 郎建平. 基于白光干涉的表面形貌接触和非接触两用测量系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
YUN J P. The study based on white light interference surface morphology of dual-use contact and non-contact measurement system[D]. *Wuhan: Huazhong University of Science and Technology*, 2008. (in Chinese)
- [8] 李东光, 张国雄. 高速精密激光干涉测量的研究现状及其关键技术[J]. *航空精密制造技术*, 1998, 34(6): 29-34.
LI D G, ZHANG G X. High speed precision laser interferometry's research and its key technologies[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technol.*, 1998, 34(6): 29-34. (in Chinese)
- [9] 李家猛. 嵌入式光纤温度传感器的设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
LI J M. The design of embedded fiber-optic temperature sensor[D]. *Hefei: Hefei University of Technology*, 2007. (in Chinese)
- [10] 张丽平. 光栅测量在汽车轮毂跳动量测量中的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.

- ZHANG L P. The application of grating measured in the beating wheel measurement[D]. *Changchun:Changchun University of Science and Technology*,2008. (in Chinese)
- [11] 陈莉. 球面曲率半径的单频激光干涉测量研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
CHEN L. The study of single-frequency laser interferometer measure in spherical radius of curvature[D]. *Nanjing:Nanjing University of Science and Technology*,2005. (in Chinese)
- [12] 韩旭东,艾华. 共光路移相单频激光干涉测长系统[J]. *光学技术*,2004,30(2):195-198.
HAN D X, AI H. Common-path phase single-rate laser interferometric system[J]. *Opt. Technique*,2004,30(2):195-198. (in Chinese)
- [13] 张景和. V形法测量中支撑对测量精度的影响[J]. *光学精密工程*,1998(5):128-132.
ZHANG J H. Support for the measurement accuracy influence in V measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*,1998(5):128-132. (in Chinese)
- [14] 刘岩,龙科慧,王立朋,等. 栅尺动态测量仪[J]. *光学精密工程*,1993,1(2):14-19.
LIU Y, LONG K H, WANG L P, et al. . Grating dynamic measuring instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*,1993,1(2):14-19. (in Chinese)
- [15] BINNIG G, QUATE C F, GEBRER C. Atomic force microscope[J]. *Phys. Rev. Lett.*,1986,56(9):930-933.

作者简介:张景和(1955—)男,吉林梅河口人,教授,主要从事精密机械、非标设备设计、超精密加工和检测等方面的研究。E-mail:zjh2059@163.com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国最早创办的液晶学科专业期刊之一
- 中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊
- 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》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、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》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述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、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40.00元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地址:长春市东南湖大路3888号

国内统一刊号:CN 22-1259/04

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn

网址:www.yjxs.com