物理实验

# 光纤马赫-曾德传感器研究

尚玉峰 王 鑫 杨胡江 肖井华

(北京邮电大学物理科学与技术学院,北京 100876)

**摘 要** 本文设计制作了一种光纤马赫-曾德传感器实验装置,优化设计得到清晰稳定空间干涉条纹。自主设计寻峰算法实现高精度条纹计数,使得在外界有扰动环境下也能精确计数。本实验装置物理思想清晰,物理现象直观,实验内容丰富,学生可通过偏振调节观察清晰的干涉图样,调节半导体温控片温度或压电陶瓷电压观察相位变化对干涉条纹移动的影响,数据采集及处理可以由学生设计算法完成测量。本实验装置结构简单,轻巧紧凑,调节方便,制作成本低,测量准确,可推广应用于大学物理实验教学中。

**关键词** 光纤传感器;偏振控制;寻峰算法

**DOI**: 10.27024/j.wlygc.2025.06.15.08

# RESEARCH ON FIBER OPTIC MACH-ZEHNDER SENSORS

**SHANG Yufeng WANG Xin YANG Hujiang XIAO Jinghua**

(School of Physical Science and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract** In this paper, an experimental device for a fiber-optic Mach-Zehnder sensor is designed and constructed, with the optimization of the design to obtain clear and stable spatial interference fringes. An independently designed peak-finding algorithm is implemented for high-precision fringe counting, enabling accurate counting even in the presence of external disturbances. The experimental device has a clear physical concept, intuitive physical phenomena, and rich experimental content. Students can observe the interference of multiple polarization states and the effect of polarization on fringe contrast by adjusting the polarization. They can also observe the effect of phase changes on fringe movement by adjusting the temperature of the semiconductor thermoelectric cooler or the voltage of the piezoelectric ceramic. Data acquisition and processing can be accomplished by students designing algorithms for measurement. The device is simple in structure, lightweight and compact, easy to adjust, low in manufacturing cost, and accurate in measurement, making it suitable for promotion and application in university physics laboratory teaching.

**Key words** fiber-optic sensor; polarization control; peak-finding algorithm

**收稿日期**: 2025-06-15; **修回日期**: 2025-10-12; **出版日期**: 2026-03-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(62474023);2023年高等学校教学研究项目(DJZW202311hb);2023年度教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题(WX202301);北京市高等教育学会2023年立项面上课题(课题编号MS2023153);北京邮电大学大学生研究创新基金(YJCX202401)。

**通信作者**: 尚玉峰, yfshang@bupt.edu.cn。

**引文格式**: 尚玉峰,王鑫,杨胡江,等. 光纤马赫-曾德传感器研究[J]. 物理与工程,2026,36(2):198-203.

**Cite this article**: SHANG Y F, WANG X, YANG H J, et al. Research on fiber optic Mach-Zehnder sensors[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 198-203. (in Chinese)

光纤马赫-曾德传感器是一种基于光纤技术的光学传感器，入射光经耦合器被分为两束，分别进入两个光纤臂进行传输，光信号经历不同的光程后，再次合并产生干涉现象，当有传感信号作用于传感臂时，传感臂和参考臂产生相位变化，通过检测干涉条纹的变化，可以精确测量温度、压力等物理量。得益于光纤传感器高精度、高灵敏度以及抗干扰能力强等特点，可以实现对液位，折射率，温度，应力等进行有效检测，光纤马赫-曾德传感器被广泛地应用于传感领域。

## 1 实验原理

光纤马赫-曾德干涉仪前端为一个 2×2 的 3dB 耦合器，输出端将两根光纤的末端去掉涂覆层，平行放置于匹配的玻璃毛细管中。干涉仪两干涉臂通过偏振控制器(PC)控制出射端 3 和出射端 4 光束的偏振态，压电陶瓷(PZT)用来控制输出端 4 光束的相位，如图 1 所示。光纤中传输光场近似为高斯光束，设入射光从端口 1 输入，其光场为 $E_1$，输出端口 3 和 4 光场分别 $E_3$、$E_4$，沿光纤出射端轴向为 $z$ 轴坐标方向，出射端光场 $E_3$、$E_4$ 表达式如下

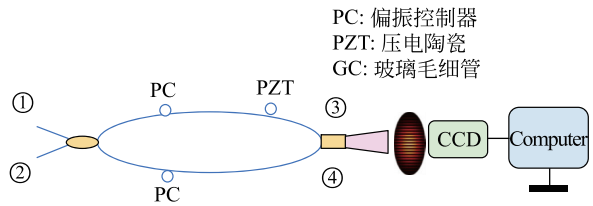



图 1 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构示意图

$$\boldsymbol{E}_3 = \hat{x}E_{3x} + \hat{y}E_{3y} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{E}_4 = \hat{x}E_{4x} + \hat{y}E_{4y} \tag{2}$$

上式中各分量表达式分别为[1-9]

$$E_{3x} = A_{3x}\exp[\mathrm{j}(\psi_3 - \varphi + \delta_{3x} + \phi_1 - \omega t)] \tag{3}$$

$$E_{3y} = A_{3y}\exp[\mathrm{j}(\psi_3 - \varphi + \delta_{3y} + \phi_1 - \omega t)] \tag{4}$$

$$E_{4x} = A_{4x}\exp[\mathrm{j}(\psi_4 - \varphi + \delta_{4x} + \phi_2 - \omega t)] \tag{5}$$

$$E_{4y} = A_{4y}\exp[\mathrm{j}(\psi_4 - \varphi + \delta_{4y} + \phi_2 - \omega t)] \tag{6}$$

在式(3)～(6)中，

$$A_{3x} = \frac{A_3\cos\alpha w_0}{w(z)}\exp\left(-\frac{x^2+(y-l)^2}{w^2(z)}\right)$$

$$A_{3y} = \frac{A_3\sin\alpha w_0}{w(z)}\exp\left(-\frac{x^2+(y-l)^2}{w^2(z)}\right)$$

$$A_{4x} = \frac{A_4\cos\beta w_0}{w(z)}\exp\left(-\frac{x^2+(y+l)^2}{w^2(z)}\right)$$

$$A_{4y} = \frac{A_4\sin\beta w_0}{w(z)}\exp\left(-\frac{x^2+(y+l)^2}{w^2(z)}\right)$$

$$\psi_3 = k_0\left(z + \frac{x^2+(y-l)^2}{2R(z)}\right)$$

$$\psi_4 = k_0\left(z + \frac{x^2+(y+l)^2}{2R(z)}\right);\varphi = \arctan\left(\frac{\lambda_0 z}{\pi w_0^2}\right)$$

$$w^2(z) = w_0^2\left[1+\left(\frac{\lambda_0 z}{\pi w_0^2}\right)^2\right];R(z) = z + \left(\frac{\pi w_0^2 n}{\lambda_0 z}\right)^2$$

$$\phi_1 = nk_0L_1;\phi_2 = nk_0L_2$$

其中，$A_3$ 和 $A_4$ 分别为光纤干涉仪出射端口 3 和 4 高斯光束中心电场振幅；$w_0$ 为高斯光束腰斑半径；$w(z)$为出射高斯光束模场半径；$x$、$y$ 为出射端面坐标，$z$ 为沿光纤出射端轴向坐标；$R(z)$为高斯光束沿轴向在 $z$ 处等相面曲率半径；$k_0$ 为真空中的波数，$k_0 = 2\pi/\lambda_0$；$\varphi$ 为高斯光束行进到空间距离 $z$ 处相对几何相移 $k_0z$ 的附加相位超前；$l$ 为光纤半径；$n$ 为光纤纤芯折射率；$L_1$ 和 $L_2$ 分别为光纤 Mach-Zehnder 干涉仪两干涉臂长度，$\phi_1$ 和 $\phi_2$ 分别为干涉臂 $L_1$ 和 $L_2$ 产生的相位；$\alpha$ 和 $\beta$ 分别为高斯光 $E_3$、$E_4$ 线偏振方向与 $x$ 轴夹角；$\delta_{3x}$ 和 $\delta_{3y}$ 分别为偏振控制器引入的 $E_3$ 在 $x$ 和 $y$ 方向相位变化，$\delta_{4x}$ 和 $\delta_{4y}$ 分别为偏振控制器引入的 $E_4$ 在 $x$ 和 $y$ 方向相位变化；$\omega$ 为光场角频率。

当 $E_3$ 和 $E_4$ 为同方向振动线偏振高斯光束，$\delta_{3x} = \delta_{3y} = \delta_3$，$\delta_{4x} = \delta_{4y} = \delta_4$，$A_4 = A_3 = 1$，$\alpha = \beta = 0$，得干涉场光强分布为

$$|E|^2 = \frac{w_0^2}{2w^2(z)}\exp\left(-\frac{2(x^2+y^2+l^2)}{w^2(z)}\right)\cdot \left\{\exp\left(-\frac{4yl}{w^2(z)}\right)+\exp\left(\frac{4yl}{w^2(z)}\right)+2\cos\left(\frac{2k_0ly}{R(z)}+(\phi_2+\delta_4)-(\phi_1+\delta_3)\right)\right\} \tag{7}$$

干涉场空间分布图如图 2 所示，干涉条纹最清晰。

## 2 实验装置

光纤马赫-曾德传感器实验装置如图 3 所示，半导体激光光源(650nm)与透镜组合，后面对接光纤，提高光耦合效率，单模光纤(650nm)制作 2×2 的 3dB 光纤耦合器放入有机玻璃盒中用胶

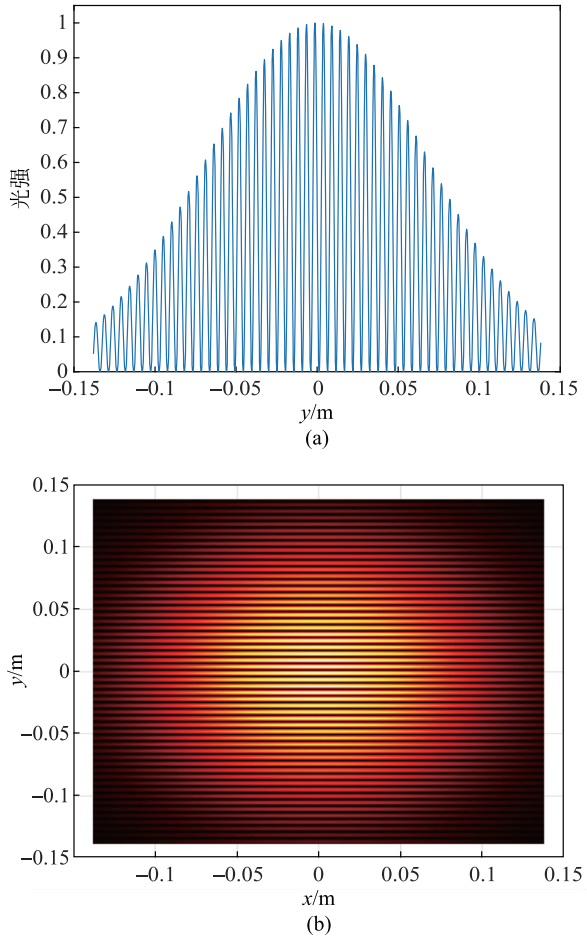



图 2 干涉场分布图

(a) 干涉条纹中间垂直方向光强分布；(b) 光强在垂直传播方向二维空间分布

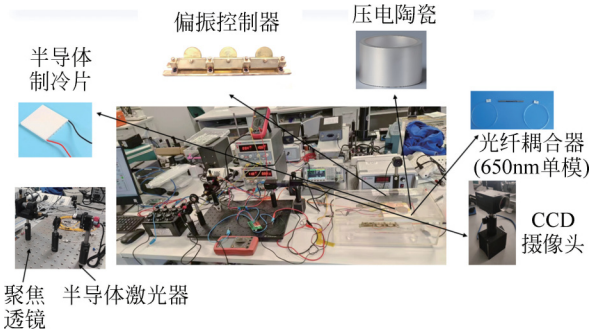



图 3 光纤马赫-曾德传感器装置图

带固定，有机玻璃盒可以有效减少外界对传感光纤的影响，保证传感器实验装置稳定性。自制三环式光纤偏振控制器用来调整输出端的偏振态，如图 4 所示，实验中为了得到最好的干涉效果，本文将两出射端光调整为振动方向相同的线偏振光，其条纹对比度接近于 1，见图 6 部分原始信号图，干涉条纹最清晰，这样保证本文后续实验的稳定性。光纤出射端选用内径 256μm 玻璃毛细管放置，如图 5(a)所示，保证两光纤平行且间距最小，出射端经多工序研磨，以保证出射光斑清晰均匀，干涉条纹间距足够大且清晰。实验中，温度传感通过半导体温控片来控制温度实现传感，电压传感通过压电陶瓷实现传感，出射端正对 CCD 摄像头，将干涉图样采集后输入电脑。

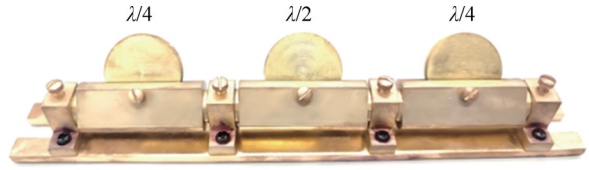



图 4 光纤偏振控制器

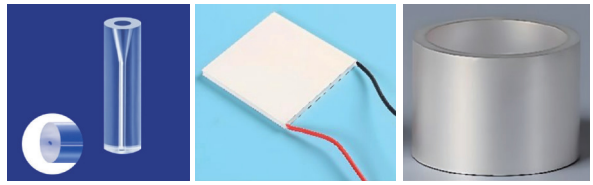



图 5 传感器部分器件图

(a) 玻璃毛细管；(b) 半导体温控片；(c) 压电陶瓷

实验中所用光源为 650nm 半导体激光器，功率为 20mW，为保证出射端光强足够大又不超出 CCD 摄像头的饱和阈值，在光源和透镜之间放置一个偏振片作为衰减器来用，保证光纤出射端光强大小合适。实验前需要对光源进行预热，保证其输出光的偏振态和功率的稳定，如果光源偏振态和输出功率不稳定，会影响输出端条纹的清晰度和条纹计数，进而影响测量结果。

温度传感由半导体温控片来改变温度，如图 5(b)所示，通过控制温控片电流方向来实现升温或者降温，将光纤传感器的传感臂放置于温控片上面，当温控片温度发生变化时，光纤折射率会发生变化，引起传感臂相位发生变化，出射端干涉条纹移动。

电压传感利用压电陶瓷来实现，如图 5(c)所示，实验中将传感臂光纤紧密绕在圆筒状压电陶瓷上，当在压电陶瓷上施加电压时，陶瓷会沿电场方向，即圆筒的径向发生形变，从而对光纤产生拉伸力，引起传感臂相位发生变化，出射端干涉条纹移动。

## 3 实验测量与结果分析

实验中，传感信号（温度/电压）的测量通过干涉条纹移动来实现。将 CCD 摄像头采集到的干涉图样输入电脑，设计 LabVIEW 程序进行信号处理。条纹准确计数无现成合适算法可用，本文自主设计了寻峰算法，将一个条纹变化转化为 360°相位变化，可实现 0.1°以下相位变化记录和测量，从而实现条纹移动的精确测量，同时还自己设计了比较算法实现条纹正反向移动计数，如图 6 所示。

实验中利用自主设计寻峰算法，如图 7 所示，

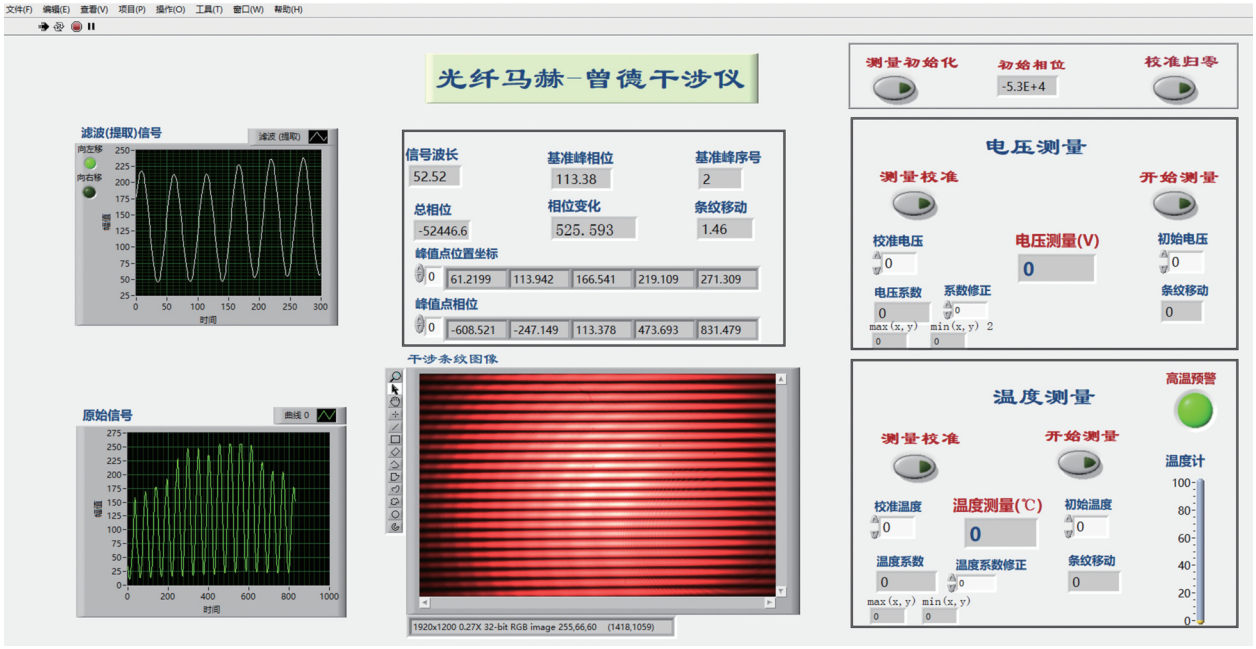



图 6 光纤马赫-曾德传感器程序界面

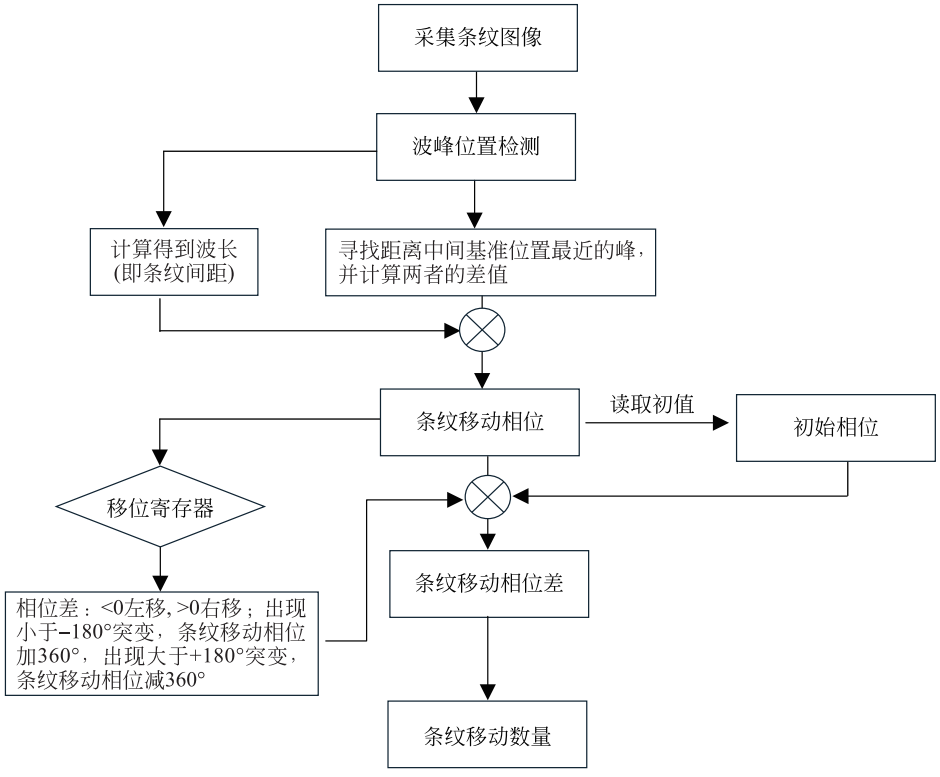



图 7 寻峰算法程序框图

精确测量条纹移动，条纹周期变化转换为 360°相位变化。首先从采样图像中截取 300 个取样点，如图 8 所示，利用连续五个峰值的相位进行计算得到波长（即一个条纹间距），选提取信号的中间 150 取样点位置为基准值，将距离基准值最近的峰作为研究对象。离基准值最近峰的位置与基准值 150 取样点位置之差对应的相位作为研究条纹移动变化的相位，称之为条纹移动相位。如果条纹移动相位减小，则条纹向左移动，反之则条纹向右移动。当条纹移动时，如果条纹移动相位出现大于＋180 度的突变，则条纹数减 1；如果条纹移动相位出现小于－180 度的突变，则条纹数加 1。通过实验发现温度变化或电压变化与条纹移动具有较好的线性关系，校准测量得到传感量与条纹移动之间的定标曲线，如图 9 所示。为了保证传感器测量的准确性，引入温度系数和电压系数的校准功能，可以利用高精度温度或电压仪表对传感器进行自动校准。利用传感器进行温度和电压的实验测量，实验结果与公式（7）相符，测量结果如表 1 所示。

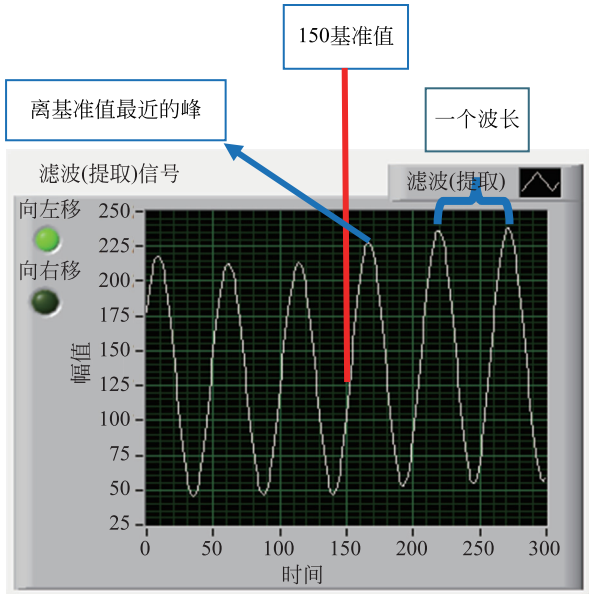



图 8 寻峰算法提取信号显示窗口

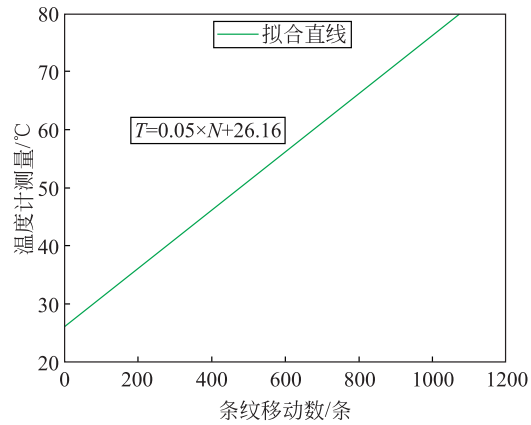



图 9 温度与条纹移动校准曲线

**表 1 光纤马赫-曾德传感器实验结果**

（a）温度传感实验结果

| 实际温度/(°) | 测量温度/(°) | 测量差值/(°) | 相对误差 |
|---|---|---|---|
| 21.2 | 21.3 | 0.1 | 0.5% |
| 35.5 | 35.9 | 0.4 | 1.1% |
| 52.1 | 52.8 | 0.7 | 1.3% |

（b）电压传感实验结果

| 实际电压/V | 测量电压/V | 测量差值/V | 相对误差 |
|---|---|---|---|
| 5.000 | 5.122 | 0.122 | 2.4% |
| 10.000 | 10.273 | 0.273 | 2.53% |
| 20.000 | 20.535 | 0.615 | 2.7% |

从实验结果可以看出，本文设计的实验装置具有较好的精度，温度/电压测量相对误差分别可以控制在 1.3%和 2.7%以下。本实验仪器灵敏度可以通过改变传感光纤部分的长度来改变，传感光纤越长，传感器灵敏度越高。

本实验中，测量误差主要来源于：

（1）外界环境的影响。如震动、温度变化等都会引起干涉条纹移动。

（2）装置的稳定性影响。如温度传感实验中，传感光纤被金属片压在半导体温控片表面，温控片表面的温度均匀性影响；电压传感实验中，传感光纤缠绕在压电陶瓷外表面，缠绕紧密性及胶粘的固定性能影响。

（3）激光光源的偏振稳定性。光源输出功率和偏振态不稳定，会影响测量时条纹计数，进而影响测量结果。

## 4 结论

马赫-曾德干涉原理为人们所熟知，但当前可以观测到清晰稳定可见光空间干涉条纹的全光纤马赫-曾德干涉仪却非常少。本文设计制作了一种光纤马赫-曾德传感器实验装置，自制偏振控制器，优化干涉臂长和出射端面，保证空间干涉条纹清晰稳定。利用 CCD 采集干涉图样，采用自主设

计寻峰算法实现高精度条纹计数，使得在外界有扰动环境下也能稳定运行，且计数精度高，大大拓宽了应用范围。本实验装置将经典物理实验马赫曾德干涉与实际传感测量应用相结合，物理思想清晰，物理现象直观，实验内容丰富，学生可通过偏振调节观察清晰的干涉图样，调节半导体温控片温度或压电陶瓷电压观察相位变化对干涉条纹移动的影响，数据采集及处理可以由学生设计算法 LabVIEW 编程完成测量，不仅增强了学生对物理实验的兴趣，还提高了他们解决实际问题的能力，使学习过程更加生动有趣。

综上所述，本实验装置结构简单、轻巧紧凑、调节方便、制作成本低、测量准确、可操作性强、可重复性好，在大学物理实验教学中具有较好的推广价值[10,11]。

## 参 考 文 献

[1] 尚玉峰，师钦贤，杨一粟，等. 基于光纤马赫-曾德尔任意偏振高斯光束干涉研究[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(21)：217-226.
SHANG Y F，SHI Q X，YANG Y S. et al. Interference of two Gaussian beam with arbitrary polarization based on fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2022，59(21)：217-226.（in Chinese）

[2] PENG F P，DU J，DU J L，et al. Contrast analysis of polarization in three-beam interference lithography[J]. Applied Sciences，2021，11(11)：4789.

[3] ZHANG H K，CHEN X Y，LIU W H，et al. Superresolution imaging of fluorescent dipoles via polarized structured illumination microscopy [J]. Nature Communications，2019，10(1)：1-10.

[4] 尚玉峰，吴重庆，刘海涛，等. 对光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的干涉场研究[J]. 北方交通大学学报，2002，26(3)：63-65.
SHANG Y F，WU C Q，LIU H T，et al. Study of interference field on optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Journal of Northern Jiaotong University，2002，26(3)：63-65.（in Chinese）

[5] 张克潜，李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 2版. 北京：电子工业出版社，2001：65-76.
ZHANG K Q，LI D J. Electromagnetic theory in microwaves and optoelectronics[M]. 2nd ed. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2001：65-76.（in Chinese）

[6] 周炳琨，高以智，陈倜嵘，等. 激光原理[M]. 7版. 北京：国防工业出版社，2021：25-89.
ZHOU B K，GAO Y Z，CHEN T R，et al. Laser principles[M]. 7th ed. Beijing：National Defence Industry Press，2021：25-89.（in Chinese）

[7] RODRÍGUEZ-LARA B M，RICARDEZ-VARGAS I. Interference with polarized light beams：generation of spatially varying polarization [J]. American Journal of Physics，2009，77 (12)：1135-1143.

[8] PESCETTI D. Interference between elliptically polarized light beams[J]. American Journal of Physics，1972，40(5)：735-740.

[9] 姚启钧. 光学教程[M]. 4版. 北京：高等教育出版社，2008：12-58.
YAO Q J. Tutorial on optics[M]. 4th ed. Beijing：Higher Education Press，2008：12-58.（in Chinese）

[10] 宋钢，张晓，王松，等. 分布式光纤传感技术在光学教学中的应用[J]. 物理与工程，2025，35(2)：84-89.
SONG G，ZHANG X，WANG S，et al. Application of distributed fiber optic sensing technology in optical teaching [J]. Physics and Engineering，2025，35(2)：84-89.（in Chinese）

[11] 尚超，王智. 物理实验教学中的融会贯通：以光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验为例[J]. 物理与工程，2024，34(5)：175-180.
SHANG C，WANG Z. Integration in physics experimental teaching：A case study of the fiber Mach-Zehnder interferometer experiment[J]. Physics and Engineering，2024，34(5)：175-180.（in Chinese）

■