

光纤温度传感器实验的改进与分析

冉 露, 廖红波

(北京师范大学 物理学系, 北京 100875)

摘要: 本文利用价格低廉的 1310 nm 商用光纤分束器、铝箔导热等对光纤温度传感器实验装置进行了改进, 并测量了改进后传感器的温度系数, 发现改进后的温度系数更加稳定, 导热条件对温度系数的测量影响较大. 最后对此实验的教学提出了建议.

关键词: 光纤温度传感器; 光纤分束器; 温度系数

中图分类号: O 4-34

文献标识码: A

文章编号: 1000-0712(2022) 01-0073-06

【DOI】10.16854/j.cnki.1000-0712.210258

光纤在现代通讯领域独占鳌头, 得到越来越广泛的应用. 因此, 光纤的工作原理与应用也是大学相关专业必须了解和掌握的知识. 光纤信号传输原理主要基于光的全反射和电磁波的波导传输理论^[1], 在普通物理和电动力学的教学中均有涉及, 而与光纤相关的实验教学主要集中在光纤物理参数(如耦合效率、数值孔径等)的测量、光纤传感器的使用以及光纤通信原理^[2-4]的介绍. 基于光纤的传感器是光纤应用的一个重要领域, 在科研、技术和工程领域具有重要且广泛的应用^[5-7], 也是大学物理实验教学研究的一个重要内容^[8,9].

在笔者所在学校购买的光纤温度传感器实验装置中, 主要存在 632.8 nm 专用 1:1 光纤分束器价格昂贵、学生可动手操作的空间较小、实验中测量得到的温度系数波动范围较大等不足. 本论文旨在利用目前已工业标准化的家用光纤跳线、光纤分束器和加热板, 设计一种经济适用、操作内容较丰富的自制光纤温度传感器, 在丰富光纤实验教学内容的同时, 增加学生动手和设计实验的机会, 以加强实验教学的效果.

1 相位型温度传感器的工作原理

相位调制型光纤温度传感器的工作原理主要基于双光束干涉. 将激光器发出的激光与光纤耦合后分束, 分别输入两根光纤中, 将两者的输出端光斑重叠在一起, 就会产生干涉条纹. 干涉光场的光强分

布为 $I \propto (1 + \cos \varphi)$, 相位差 φ 是与温度相关的函数, 可写为

$$\varphi(T) = \frac{2\pi}{\lambda} n(T) L(T) \quad (1)$$

其中 λ 为激光波长, 光纤折射率 n 与光纤长度 L 均为温度 T 的函数.

两根光纤中一根为参考臂置于自然环境, 另一根为测量臂放入待测温度场中, 当待测温度场发生变化时, 由式(2)可知测量臂光纤会产生相位的变化, 从而引起干涉条纹级次的变化, 即条纹产生移动:

$$\Delta\varphi(T) = \frac{2\pi}{\lambda} (L\Delta n + n\Delta L) \quad (2)$$

干涉条纹移动的数量与被测温度场的变化息息相关. 定义温度每变化 1 °C, 干涉条纹的移动个数即为光纤温度传感器的温度系数.

2 实验装置介绍

本实验采用的实验装置实物图如图 1 所示, 主要由氦氖激光器、光纤五维耦合调节架、光纤分束器、加热装置、光纤架、CCD 和温度显示器组成. 加热器的结构简图如图 2 所示.

首先对光纤的端面进行处理, 使其光滑平整, 然后用光纤专用的铜管固定, 放入五维调节架中, 调节光路共轴, 并将光纤输入端置于聚焦透镜的焦点处, 使光纤的耦合输出功率足够大, 经耦合头将光输入

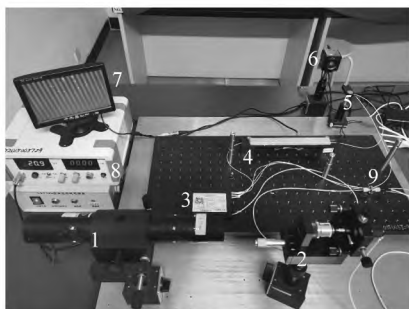
收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 北京师范大学物理学系近代物理实验教学团队项目以及北京师范大学教学改革项目(项目号 20-04-07)资助

作者简介: 冉 露(1998—), 女, 重庆巴南人, 北京师范大学物理学系 2017 级本科生.

通信作者: 廖红波, E-mail: hbliao@bnu.edu.cn

分束器,分束器输出的光纤一支嵌入导热板缝隙中,作为探测臂,一支置于空气中作为参考臂,两支光纤的输出端固定在光纤架上,用 CCD 观察干涉条纹,打开加热器,随着温度的变化,干涉条纹会发生定向的移动,由此可以测定光纤温度传感器的温度系数。



1. 激光器; 2. 五维调节架; 3. 光纤分束器; 4. 加热器; 5. 光纤架;
6. CCD; 7. 显示器; 8. 温度显示器; 9. 光纤耦合头

图1 实验装置实物图

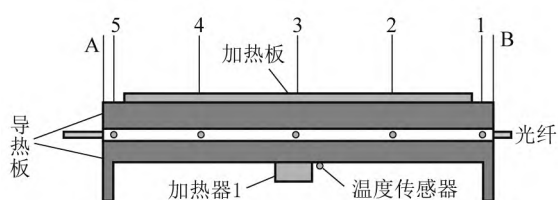


图2 加热器的结构简图

3 实验存在的问题

本校购买的光纤温度传感器采用局部加热方式,即加热源较小且位于导热板的中心位置(如图2所示的加热器1),温度计测温探头也位于加热器附近,这必然导致导热板各处温度分布的不均匀。

另外,仪器专配的 632.8 nm 波长 1:1 分束器价格昂贵(每组约 2 000 元),分束器分束部分和输入、输出接口设计简陋、脆弱易断,输出端固定不可调,学生在实验过程中除了光纤耦合,几乎没有可动手调节的环节,这不利于培养学生的动手能力和实验技能。

在实验教学中,教师们还发现此仪器测量的光纤温度系数波动范围大,数值不稳定。同一台设备,不同同学测量的温度系数有时可相差近 1 倍,而且升温与降温过程测得的系数常常出现明显差别,使学生产生光纤温度传感器不可靠、不可逆的错误认识,在一定程度上降低了学生学习的积极性,也不利于培养学生形成严谨的科学研究态度。

4 实验装置的改进

基于实验中存在的问题,本文对该实验装置进行分析后,决定主要对光纤分束器和加热系统进行改进。

首先,为了改进温度场的分布,选择了与导热板长度接近的条形加热板(如图2中上面的加热板),这是一种家用的恒温加热板[如图3(a)所示],长度为 20 cm,电压规格有 220 V/12 V/24 V,恒温温度为 60 °C ~ 300 °C。试用时发现,12 V/24 V 的加热板在本实验条件下加热速度太慢,所以本文选择了 220 V 的工作电压。考虑到光纤套塑的耐热温度以及学生实验时的安全,选择了加热板的恒定温度为 60 °C。将买来的加热板涂上导热胶,固定在导热板上,如图2所示。本文中的导热板长约 24 cm,加热板由于是固定规格产品,只有 20 cm 长,若有必要也可以考虑定制加工。

第二项改进是用便宜的商用石英光纤分束器代替专用的分束器。市场上专用的光纤分束器有“1分2”“1分4”“1分8”……等各种规格,但其工作波长通常为 1 310 nm,在此波长其各个端口出射的光强比较接近。但本实验采用的是 632.8 nm 的氦氖激光器,所以分光比例会发生变化,因此不能采用“1分2”的分束器,通常此类分束器在 632.8 nm 分出的两束光的光强相差很大,这会导致干涉条纹的光强对比度很低,条纹明暗不明显。本文建议采用“1分4”的分束器[如图3(b)所示],其价格大约为每个20~30元,虽然分束后的光强差别较大,但总能找到光强相近的两束光,而且由于分束端口较少,相应的出射光强也比较大,方便进行干涉条纹的调整与观察。



(a) 加热板



(b) “1分4”分束器

图3 实验中采用的改进元件

第三改进了光纤与导热板之间的导热条件。原来的实验中,包裹着套塑的光纤直接放入导热板间的凹槽中,并用耐热泡沫压紧,光纤与导热板的接触

受制于泡沫的松紧, 光纤上的实际温度与温度传感器测得的温度不一致. 本实验将采用裸光纤加铝箔的方式, 尝试改进光纤与导热板间的热传导.

5 实验研究

为了考察改进后的光纤温度传感器的实验效果, 本文利用改进前后的实验设备进行了温度系数的测量.

1) 测量不同加热条件下导热板凹槽中的温度场. 如图2所示, 将导热板分为4个部分、5个测量点, 分别在这5个点附近放入校准好的温度计, 固定温度探头使其尽量贴紧导热板. 分别使用条形加热板(上部)和局部加热器1(下部)进行升温, 用手机录像, 测量各点温度随时间的变化. 当温度大于40℃时, 关闭加热器, 观察自然降温条件下各点的温度分布.

2) 测量不同加热条件下, 光纤温度传感器的温度系数. 按图1连接光路, 保证光纤耦合输出大于100 μW, 确保光纤分束器四个端口输出的光强足够, 便于观察干涉条纹. 选择两个光强接近的输出端, 对端口进行切割处理, 然后用CCD接收干涉条纹. 在升温、降温过程中用手机录像功能同时记录温度的变化和条纹的移动. 录像结束后, 可以利用手机的快放或慢放功能, 测量干涉条纹变化数(ΔN)对应的温度变化(ΔT), 作图求出光纤温度传感器的温度系数 $\Delta N/\Delta T$. 考虑到室温和套塑的耐热, 温度范围一般限制在30~45℃.

3) 测量不同导热条件下的温度系数. 分布使用裸光纤和有套塑的光纤, 利用耐热泡沫和铝箔固定光纤, 以及改变测量的环境条件等, 按上述的测量过程, 在控制变量的条件下, 分别测量不同条件下, 光纤温度传感器的温度系数.

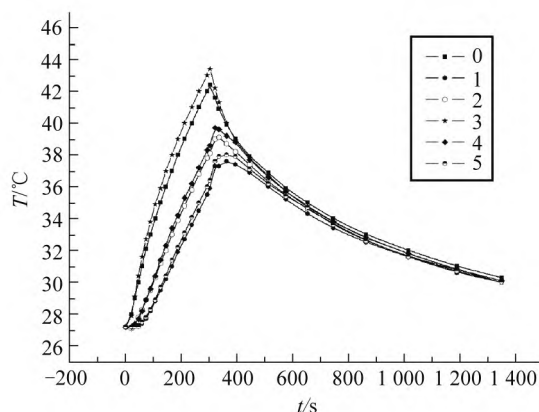
6 实验结果与分析

6.1 加热板凹槽中的温度分布

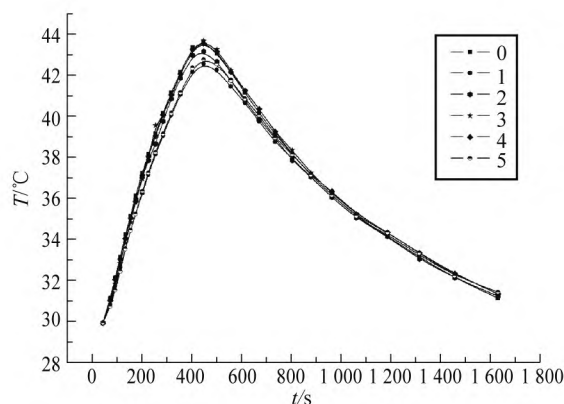
由图4中温度的分布可以发现, 如果采用局部加热器1[图4(a)], 在升温过程中, 图2中各点的温度差异较大, 中间升温快, 两端温度上升慢且滞后严重, 中间与两端的温差最大可达6℃. 关闭加热器后, 中间(温度计3)开始降温的同时, 两侧的其他温度计却依然在升温, 通常需要一段时间(约1分钟左右)各测温点的温度变化才会同步. 而改用平板加热器后, 每个测量点的温差和滞后现象明显改进[图4(b)], 最大温差不超过2℃, 导致这种温差的

原因可能是加热板比导热板两端各短了2 cm.

在降温过程中, 由于依赖环境温度自然降温, 各点降温条件相同, 所以图4中不同加热情况下的降温趋势很接近, 但由于降温前的初始温差不同, 图4(a)中的各点在降温过程中的温差稍微大一点.



(a) 加热器1形成的温度分布



(b) 加热板形成的温度分布

图4 不同加热器形成的温度分布(温度传感器编号: 0为原仪器自带温度计, 1—5号代表图2中的5个测量处放置的温度计)

6.2 温度系数的测量

选择光强输出相近的光纤端口, 可以形成对比度非常好的干涉条纹, 如图5所示, 清晰的干涉条纹有利于后面的条纹移动个数的测量. 适当调节播放速度, 可以观察到, 用局部加热器时, 当温度大于37℃时, 条纹移动变得不稳定, 常常来回晃动, 给计数带来一定的困难, 而用加热板时, 条纹移动的单向性更好. 外部环境的振动、噪声、人员的走动, 常常会对条纹的移动产生临时的影响, 因此在测量温度系数的过程中, 应尽量保证环境安静.

每移动5~10个条纹记录温度的读数, 做 $\Delta N-\Delta T$ 关系图, 直线拟合求其斜率, 就可得到光纤温度传

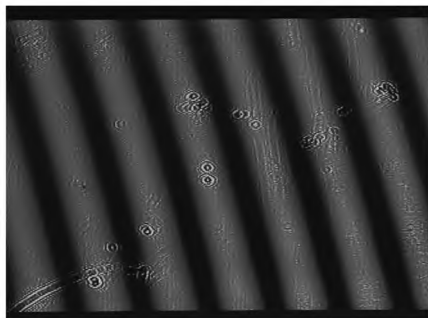


图5 实验中观察到的干涉条纹

传感器的温度系数,如图6所示.

图6是升温过程中获得的典型的干涉条纹移动个数随温度的变化曲线.这里的温度数值采用的是原仪器自带的温度计,即图4中的0号温度计.其中曲线a是采用局部加热器1升温,而曲线b采用加热板升温.很明显,从室温开始升温时,条纹的移动个数与温度具有很好的线性,但当温度偏高时, ΔN 随 ΔT 的变化开始偏离原有的斜率.用加热器1时,温度高于38℃时,就开始偏离,而用加热板时,良好的线性关系一直维持到44℃,这与图4(a)中显示的在温度较高时,各点的温度差变大有关.此时用中心点的温度来代表整个光纤的平均温度已经不合理了.导热板加热时温度差别更小,故线性更好.

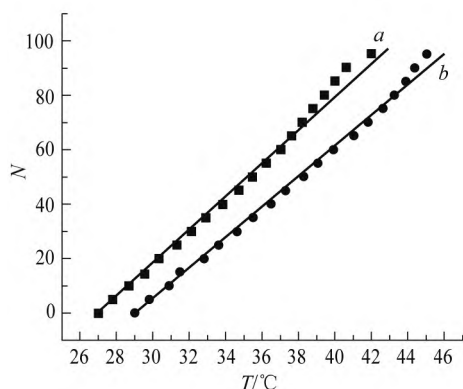


图6 升温时干涉条纹移动个数与温度的关系
(a. 用加热器1升温; b. 用加热板升温)

降温过程中,干涉条纹移动个数随温度的变化曲线如图7所示.由于降温时依赖环境条件,所以除了刚开始降温时曲线a、b具有差异,当温度小于40℃之后,两种情况的变化趋势变得一致.这与图4中温度场在降温过程的分布是一致的.也就是说由于升温条件不同导致的温度差异最终趋于一致,这对温度传感器温度系数测量的影响是很重要的.

在本文计算温度系数时,通常去除偏离线性较

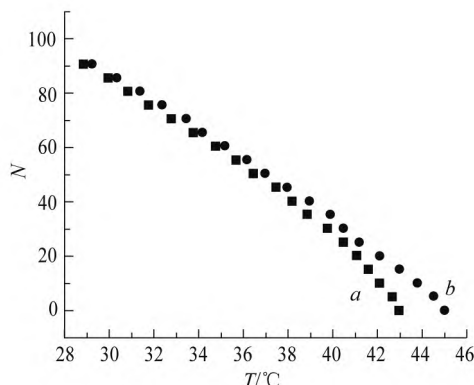


图7 降温时干涉条纹移动个数与温度的关系(a. 用加热器1升温后降温; b. 用加热板升温后降温).

大的高温部分,只拟合线性较好的低温部分(30~40℃).

6.3 温度系数测量的稳定性

前面提到过,在教学中发现学生测量的温度系数差异较大.本文在分析可能影响其测量的因素后,通过控制变量、改变实验条件、进行多次测量,尝试找到影响温度系数测量结果的主要因素.

首先由于实验课时的限制,通常学生在教学中只能进行一次升温过程和一次降温过程的测量,当学生发现两次过程有较大差异时,往往会认为温度传感器测温过程不可逆,显然这种思想是不正确的.因此本文对两种加热方法在升温、降温过程进行了多次测量,结果如表1所示.表1中所有实验采用同一只用铝箔包裹的有套塑的光纤.很显然,用加热器1升温得到的温度系数差异可以达到30~40%,而其升温与降温之间的差异最高可以达到接近50%.用加热板加热获得的数据差异度稍微小些.

如表1数据可知,10次测量得到的不同加热方式下的温度系数平均值差别并不大,在6.3~6.9条/℃之间,加热器1数据的方差大于加热板,升温过程的方差大于降温过程.从表1结果可知,加热板的使用提高了实验结果的稳定性.

表1 多次测量得到的温度系数(条/℃)

测量次数	加热器1		加热板	
	升温	降温	升温	降温
1	6.7	7.2	6.1	6.5
2	7.0	6.9	5.9	6.8
3	6.9	7.0	6.5	5.9
4	5.0	7.0	6.4	6.2

测量次数	续表			
	加热器 1		加热板	
	升温	降温	升温	降温
5	6.0	6.3	6.2	6.4
6	5.7	6.0	6.1	6.3
7	5.8	7.4	7.5	6.8
8	6.4	6.4	7.3	7.0
9	6.2	7.5	7.0	7.1
10	7.2	6.9	6.8	7.0
平均	6.3	6.9	6.6	6.6
方差	0.4	0.2	0.2	0.1

6.4 导热条件对温度系数的影响

导热是温度测量中必须考虑的因素. 实验中为了保护易断的石英光纤, 通常采用有套塑的光纤, 在剥除套塑的过程中, 可以明显感觉到不同厂家生产的光纤的套塑与光纤的结合紧密程度是不同的, 甚至同一厂家不同批次的光纤, 套塑的松紧也是不同的.

本实验中光纤依靠导热板导热改变温度. 原来实验中采用的耐热泡沫固定光纤, 不能很好地控制光纤与导热板的接触程度. 本文利用铝箔包裹光纤, 塞入导热板凹槽中, 测得的温度系数如表 2 所示. 此表中的数据采集过程均采用加热板加热, 并进行多次测量. 表 1 中的数据表明, 套塑对温度系数的测量存在较大的影响, 裸光纤的温度系数为 9.0 条/℃, 明显大于有套塑时的 6.6 条/℃. 而使用铝箔后温度系数也有一定的提高, 这说明铝箔可以改善光纤与导热板间的热传导, 使光纤的实际温度更接近温度计示数. 使用泡沫固定光纤不能使光纤与加热板很好的接触, 影响温度系数的大小. 学生在固定泡沫松紧时差异较大, 会导致测得的温度系数偏离真值, 造成数值的波动.

表 2 导热条件对温度系数的影响(条/℃)

	套塑+隔 热泡沫松	套塑+隔 热泡沫紧	套塑 +铝箔	无套塑 +铝箔
温度系数	3.7	5.2	6.6	9.0

实验中发现, 当使用同一分束器中不同的光纤进行加热时, 得到的温度系数差别不大, 但使用不同批次的分束器时, 温度系数有时会有一定的差异, 这可能与套塑的松紧有关, 剥除套塑后其温度系数差别不大.

6.5 温度系数的理论计算值与实验值的比较

原则上, 如果采用的光纤的规格和探测臂长度

确定时, 光纤温度传感器的温度系数应该是确定的. 查阅相关资料可知^[5], 石英玻璃在 632.8 nm 波长处的折射率为 1.458, 本实验采用的探测臂光纤的长度为 0.24 m, 石英玻璃的热膨胀系数为 $5.5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, 折射率温度系数 $\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T}$ 为 $6.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. 将这些参数代入式(2)中可得

$$\frac{\Delta N}{\Delta T} = \frac{\Delta \varphi}{2\pi \Delta T} = \frac{1}{\lambda} \left(L \frac{\Delta n}{\Delta T} + n \frac{\Delta L}{\Delta T} \right) = \frac{1}{6.328 \times 10^{-7}} \cdot (2.379 \times 10^{-6} + 1.925 \times 10^{-7}) / ^\circ\text{C} = 4.06 / ^\circ\text{C}$$

理论计算结果与表 2 中的数据比较接近, 但明显偏小. 在上面的理论计算中, 由于没有查阅到本实验光纤的纤芯成分和掺杂情况, 因此折射率的温度系数和热膨胀系数没有考虑纤芯掺杂对其的影响. 同时, 在 ΔL 的变化中没有考虑光弹系数、纵/横向应力对其的影响, 而且不同光纤结构、材料和制造工艺会影响这些参数的大小, 从而导致光纤温度传感器温度系数的变化.

在上述的计算中 $L \frac{\Delta n}{\Delta T}$ 值为 2.376×10^{-6} , 而 $n \frac{\Delta L}{\Delta T}$ 的值为 0.1925×10^{-6} , 可见, 折射率变化比热膨胀对温度系数的影响大一个数量级, 这也是光纤温度传感器常常忽略热膨胀的原因. 但是光纤涂敷层的杨氏模量和热膨胀系数会对光纤温度传感器的温度系数产生重要影响^[5], 这也是导致计算值与实验值差异的原因.

7 教学建议

根据以上的实验结果, 笔者认为, 在光纤温度传感器实验中所采用的商用分束器和加热板便宜易得, 实验结果也更稳定, 还可以自行搭建实验设备. 改进后的实验装置简单、经济, 既节省了教学经费又丰富了实验内容.

由于光纤传感器涉及的物理原理相对较简单, 在实验教学中, 可以将改进后的实验设置为设计性、研究性实验, 而不是让学生按部就班的完成规定内容. 教学内容可以包括: 让学生自己设计温度传感器的实验装置; 研究导热方式对温度系数测量的影响; 分析各种影响温度系数测量的因素并进行实验验证; 分析并验证影响干涉条纹对比度和条纹间距的因素并验证; 测量温度分布对温度系数的影响; 改变加热器的工作电压, 改变升温速度, 测量升温速度对温度系数的影响.

这样设计的实验其教学内容丰富多样, 灵活度

高,学生在实验中可操作的环节更多,这有利于学生更好地了解光纤温度传感器的工作原理,培养学生的动手能力和分析问题解决问题的能力。

8 总结

本文在分析现有光纤温度传感器实验所存在问题的基础上,提出改进意见。采用商用 1 310 nm “1 分 4”光纤分束器、60 ℃ 恒温加热板和铝箔导热对实验进行了改进,并测量了改进后光纤传感器的温度系数,发现测量得到的温度系数更大、更稳定,实验中得到的温度系数与理论计算得到的值比较接近。最后建议将改进后的实验设置为设计性、研究性实验,这有利于学生正确理解实验现象,有利于增加了学生的动手机会,培养学生的动手能力。

参考文献:

- [1] 张伟刚.光纤光学原理及应用[M].2 版.北京:清华大学出版社,2017.
- [2] 黄怀仁.近代物理实验[M].北京:北京理工大学出版社,2019.
- [3] 浦天舒,郭英,李博,等.大学物理实验[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [4] 徐建强,徐荣历.大学物理实验[M].2 版.北京:科学出版社,2014.
- [5] 孙圣和,王廷云,徐影.光纤测量与传感技术[M].3 版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [6] 李川,李英娜.光纤传感器技术[M].北京:科学出版社,2012.
- [7] 廖廷彪,黎娜,张敏,等.光纤传感技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [8] 曾凡超,郝洪云,胡琪,等.强度解调型光纤光栅温度传感实验[J].大学物理,2020,39(2):31-33.
- [9] 裴世鑫,崔芬萍,谢欣桐.基于光纤干涉的温度与压力传感实验系统设计与实现[J].大学物理,2018,37(5):52-56.

Improvement and analysis of optical-fiber temperature sensor experiment

RAN Lu, LIAO Hong-bo

(Department of Physics, Beijing normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper, the optical-fiber temperature sensor experiment is modified by using a cheap commercial fiber splitter at 1310 nm and aluminum foil for thermal conducting. The temperature coefficient is measured and found to be more stable after improvement. Also, the conducting condition can infect the temperature coefficient a lot. At last, teaching suggestion is proposed.

Key words: optical-fiber temperature sensor; optical fiber splitter; temperature coefficient

(上接 67 页)

Analysis of the rotation modes of the coin under different conditions

FANG You-le, WANG Tian-xiao

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China.)

Abstract: In this paper, the basic equations of motion of coins under different conditions are derived. The problem of the coin's motion around a circle is analyzed, and two special modes of motion are discussed using the results, which are finally verified via experiments and numerical simulations.

Key words: coin; disk; rotation mode; nutation; stability