

物理实验教学中的融会贯通 ——以光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验为例

尚超 王智

(北京交通大学物理科学与工程学院, 北京 100044)

摘要 实验教学是大学物理大类课程教学中非常重要的一环, 实验设备就是连接抽象理论和直观现象最好的桥梁。实验授课教师不仅需要对实验涉及的各个知识点做深入讲解, 还需要将实验关联课程中的理论知识和应用技术进行融会贯通, 利用实验课这种面对面高效沟通的教学方式, 引导同学们更深刻地理解物理现象的本质。本文以光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验为例, 介绍了在该实验教学中的融会贯通相关知识点的方式, 旨在让学生通过实验操作过程和结果分析来拓展完善自身物理相关知识体系。

关键词 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 光纤耦合; 偏振

KNOWLEDGE INTEGRATION IN PHYSICS EXPERIMENT TEACHING —TAKING FIBER MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER EXPERIMENT AS AN EXAMPLE

SHANG Chao WANG Zhi

(School of Physical Science and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Experiment teaching is a very important part of the teaching of university physics courses. Experiment equipment serves as the best bridge connecting abstract theories with intuitive phenomena. Teachers of laboratory courses need to not only provide in-depth explanations on the various knowledge points involved in the experiment but also integrate the theoretical knowledge and application techniques. By the efficient face-to-face communication in the experiment courses, teachers can guide students to a deeper understanding of the essence of these physical phenomena. This paper takes the optical fiber Mach-Zehnder interference experiment as an example, introducing the way to integrate related knowledge points in the teaching of this experiment, aiming to allow students to expand and perfect their own physical knowledge system through the experimental operation process and result analysis.

Key words optical fiber Mach-Zehnder interferometer; optical fiber coupling; polarization

物理学研究物质的基本结构、基本运动形式和相互作用, 其基本理论是许多其他自然科学和工程技术的根基。华裔物理学家丁肇中在科学研

究中非常重视实验, 他认为物理学是在实验与理论紧密相互作用的基础上发展起来的。实验教学是大学物理大类课程教学中非常重要的一环, 实

收稿日期: 2024-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(62175012)。

通信作者: 尚超, 北京交通大学物理科学与工程学院副教授, cshang@bjtu.edu.cn。

引文格式: 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.

Cite this article: SHANG C, WANG Z. Knowledge integration in physics experiment teaching—Taking fiber Mach-Zehnder interferometer experiment as an example[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 175-180. (in Chinese)

验设备就是连接抽象理论和直观现象最好的桥梁。随着移动互联网的普及,大量线上物理类课程和虚拟实验课程极大地丰富了学生获取知识的途径,同时也不可避免地带来一个新的问题,如何筛选学习并融会贯通。作者曾在课堂与本科生交流,不少学生反映现在的物理类课程课堂授课节奏紧凑,同时课前和课后需要关注的线上内容占用他们大量的时间,但有时候收效并不明显。本科教学是面向广大学生且有大纲进度要求的,通常教师备课所花的时间是大于授课时长的,换句话说,让学生只在课堂时间里完全掌握教师讲授的内容是不太现实的,必须要有充分的预习和复习,因为很多理论从了解到深入理解是一个“非线性”过程,可能是在以后同类知识的学习或观察中“突然开窍了”,在这个过程中起决定性作用的是自身相关背景知识框架的不断拓展和完善。鉴于此,老师最大的作用并不是将知识“搬移”给学生,而是把自己多年来对相关知识体系的思考总结与融会贯通后的“干货”传授给学生,缩短学生“开窍”的时间,提升学生的学习效率。大学物理实验单次课的课时长,学生数量少,课堂节奏没有那么紧凑,教学内容和教学环境非常有利于师生之间一对一的答疑解惑。再者因为要涉及到实验系统的搭建和实验仪器的操作,对同学们的动手能力也有一定的要求,在这个过程中通常不只涉及实验主题所在课程的知识点,还会在讲解实验理论知识和相关现象实际应用的过程中,甚至在和同学互动解决其操作问题的过程中,接触到很多关联课程的知识点。这时候如果实验教师能够对实验中所涉及的各个知识点做深入的讲解,将关联课程中的理论知识和应用技术进行融会贯通,则会对同学们在自身物理学知识体系建设的过程中起到非常高效的促进作用。本文以光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验为例,介绍了在该实验教学中

的融会贯通相关知识点的方式。

1 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验

干涉仪利用波的叠加性来获取波的相位信息,从而获得实验所关心的物理量,干涉仪并不仅仅局限于光学干涉仪。干涉仪在天文学、工程测量、海洋学、地震学、波谱分析、量子物理实验、通信、传感、遥感、雷达等等精密测量领域都有广泛应用。激光干涉精密测量具有纳米甚至皮米高分辨率,以及数米、几千米甚至上千千米的超长测量范围等突出优点^[1]。在这里可以复习光的干涉原理和光学干涉仪的种类,讲解光学干涉仪在科研和工程领域的重要应用^[2-4],例如超精密微纳制造、引力波探测等先进技术和前沿科学领域。

光纤 M-Z 干涉仪实验的教学目的如下:

- (1)使学生了解光纤 M-Z 干涉仪的基本原理及调整方法;
- (2)使学生掌握光源与光纤耦合的基本方法;
- (3)掌握光纤偏振控制器的原理及使用方法;
- (4)掌握使用压电陶瓷(PZT)进行光纤相位调制的工作原理及使用方法。实验装置主要分为4个部分:(1)光源、(2)耦合装置、(3)光纤干涉仪核心部分、(4)接收装置,如图1所示。

1.1 实验教学的核心知识部分

光纤 M-Z 干涉仪是本实验的核心,其结构虽然简单,但是却涵盖了很多理论知识。通常光纤 M-Z 干涉仪主体是由2个50:50分光的光纤耦合器组成,偏振控制器用于控制干涉臂的偏振态,这里为了方便调节,两臂上各有一个偏振控制器。缠绕光纤的压电陶瓷环置于一臂,通过调节加载的直流电压来微调两个干涉臂的光程差。

1) 光纤耦合原理

光的模式是指光波在特定介质中传播时所表

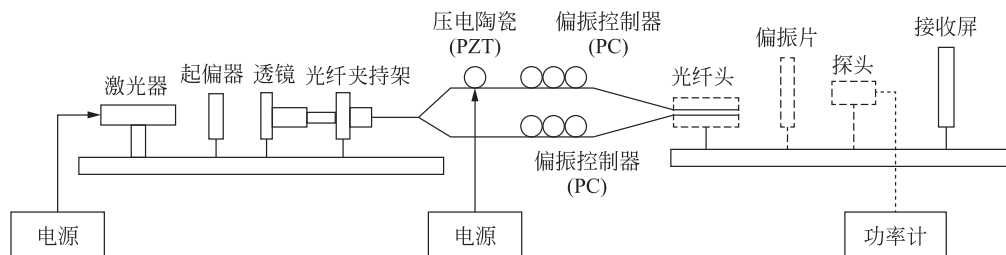


图1 光纤 M-Z 干涉实验系统

现出的稳定状态,分为横模和纵模。横模是光波在波导横截面上的场分布,从数学上讲其是满足模式场亥姆霍兹方程及边界条件的特解;而纵模则是光波在波导中沿着传播方向的相位分布。对模式之间的耦合,又分为横向耦合和纵向耦合。光波导的横向耦合指当两个介质波导靠得很近时,由于消逝场的作用,会发生两个波导之间的能量转移;而一个波导不同模式之间的耦合称为纵向耦合,通常我们使用模耦合方程来进行描述。当描述光在光学元件中的传输状态变化时,我们会使用传输矩阵来构建两个界面电磁场之间的关系,传输矩阵可以累乘。

图2是光纤耦合器示意图,在光纤中,绝大部分光都集中在芯层,但总有很小部分能量散布于包层。当两个光波导相互靠近时,一个光波导的光能将耦合到另一个之中,从而改变各个光波导的场分布,而这种变化反过来对原光波导产生影响,这就是两光波导的横向耦合^[5]。耦合方程

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dz} = j\beta a_1(z) + jka_2(z) \\ \frac{da_2}{dz} = jka_1(z) + j\beta a_2(z) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $a_1(z)$, $a_2(z)$ 分别为耦合器中的两个模式, k 为模耦合系数, β 是光在光纤中传播常数,耦合方程的解为

$$\begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \end{bmatrix} = \exp(j\beta z) \begin{bmatrix} \cos(kz) & j\sin(kz) \\ j\sin(kz) & \cos(kz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(0) \\ a_2(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $a_1(0)$, $a_2(0)$ 分别为耦合器输入端的两模式。如果 $a_1(0) \neq 0$, $a_2(0) = 0$, 则

$$\begin{cases} |a_1(z)|^2 = \cos^2(kz) |a_1(0)|^2 \\ |a_2(z)|^2 = \sin^2(kz) |a_1(0)|^2 \end{cases} \quad (3)$$

取 $\alpha = \cos^2(kz)$, $P_{1in} = |a_1(0)|^2$, 取耦合器的耦合长度为 L , $P_{3out} = |a_1(L)|^2$, $P_{4out} = |a_2(L)|^2$, 则上式变为

$$\begin{cases} P_{3out} = \alpha P_{1in} \\ P_{4out} = (1 - \alpha) P_{1in} \end{cases} \quad (4)$$

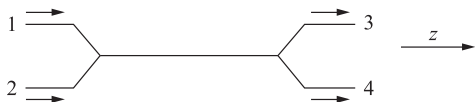


图2 光纤耦合器示意图

其中, α 称为分光比, 实验系统中 $\alpha = 0.5$ 。

2) 光纤 Mach-Zehnder 光纤干涉仪原理

通常光纤 M-Z 干涉仪主体是由 2 个光纤耦合器组成, 如图 3 所示。

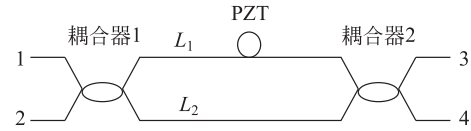


图3 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪结构示意图

图3中1、2端为光输入端,3、4为光输出端,两个50:50耦合器串联,光从输入端进入光纤,经第一个耦合器分束,进入干涉臂 L_1 , L_2 中,在干涉臂 L_1 中的光的位相可以通过调节 PZT(压电陶瓷)进行调制,然后进入第二个耦合器,最后从3、4端出射。假设两根光纤是完全一样的,输入端光 E_1 、 E_2 , 输出端光场 E_3 、 E_4 , 则

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-C_2} & -j\sqrt{C_2} \\ -j\sqrt{C_2} & \sqrt{1-C_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \exp(-jk_0 n L_1) & 0 \\ 0 & \exp(-jk_0 n L_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{1-C_1} & -j\sqrt{C_1} \\ -j\sqrt{C_1} & \sqrt{1-C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, C_1 , C_2 为耦合器1和耦合器2的分光比, k_0 为真空中波数, n 为光纤芯层折射率, L_1 , L_2 为两光纤臂长度, $\begin{bmatrix} \sqrt{1-C_1} & -j\sqrt{C_1} \\ -j\sqrt{C_1} & \sqrt{1-C_1} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} \sqrt{1-C_2} & -j\sqrt{C_2} \\ -j\sqrt{C_2} & \sqrt{1-C_2} \end{bmatrix}$

分别为定向耦合器1, 定向耦合器2的传输矩阵,

$\begin{bmatrix} \exp(-jk_0 n L_1) & 0 \\ 0 & \exp(-jk_0 n L_2) \end{bmatrix}$ 为光纤段传输

矩阵。取 $E_2 = 0$, $C_1 = 0.5$, 由于耦合器2是弱耦合, 故 $C_2 = 0$ 。由式(1-1)得

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_1 \begin{bmatrix} \exp(-jk_0 n L_1) \\ -j\exp(-jk_0 n L_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

设1端输入功率为 P_1 , 输出端功率分别为 P_3 , P_4 , 即

$$\begin{cases} P_3 = \frac{P_1}{2} \\ P_4 = \frac{P_1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

设光纤中传输的场可近似用高斯分布表示, 由光纤端面出射的光束近似为高斯光束

$$\begin{cases} E_3 = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + (y-l)^2}{w^2(z)}\right) \cdot \\ \exp\left(jk_0\left(z + \frac{x^2 + (y-l)^2}{2R(z)}\right) - j\phi_1(z)\right) \\ E_4 = \frac{A_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{x^2 + (y+l)^2}{w^2(z)}\right) \cdot \\ \exp\left(jk_0\left(z + \frac{x^2 + (y+l)^2}{2R(z)}\right) - j\phi_2(z)\right) \end{cases} \quad (8)$$

其中, A_0 为高斯光中心振幅, $w(z)$ 为出射光模场半径, $R(z)$ 为高斯光束在 z 处等相面曲率半径, x, y 为出射端面坐标, z 为离端面的距离, $2l$ 是耦合器的两个高斯场的中心距, 得到在距离光纤端面 z 处的干涉场强为

$$\begin{aligned} |E|^2 = & \frac{A_0^2}{w^2(z)} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2 + l^2)}{w^2(z)}\right) \cdot \\ & \left\{ \exp\left(-\frac{4yl}{w^2(z)}\right) + \exp\left(\frac{4yl}{w^2(z)}\right) + \right. \\ & \left. 2\cos\left(\frac{2kly}{R(z)} - (\phi_1(z) - \phi_2(z))\right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

由于光耦合器 2 是弱耦合, 在出射端可近似认为 l 为两纤芯间距离的一半, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, 上式中

$$\phi_1(z) - \phi_2(z) = nk_0(L_1 - L_2) = nk_0\Delta L \quad (10)$$

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda_0 z}{\pi w_0^2 n} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$R(z) = z + \left(\frac{\pi w_0^2 n}{\lambda_0} \right)^2 \frac{1}{z} \quad (12)$$

其中, w_0 为光场的高斯腰半径。由此可得出各条纹的间距近似相等, 为

$$\Delta y = \frac{2\pi}{2k_0 l / R(z)} = \frac{\pi}{k_0 l} \left\{ z + \left(\frac{\pi w_0^2 n}{\lambda_0} \right)^2 \frac{1}{z} \right\} \quad (13)$$

当接收距离 $z \gg 1\text{cm}$ 时, 条纹数

$$m = 2 \frac{w}{\Delta y} \approx \frac{\lambda_0 z / \pi w_0 n}{\pi z / k_0 l} = \frac{\lambda_0 k_0 l}{\pi^2 w_0} = \frac{2l}{\pi w_0} \quad (14)$$

由式(14)可知, 当 z 较大时, 条纹数 m 只与耦合器中两光纤间的距离 $2l$ 和光纤中光场的高斯腰半径 w_0 有关, 当激光器的 $\lambda_0 = 632.8\text{nm}$, $2l = 125\mu\text{m}$, $w_0 = 1.5\mu\text{m}$ 。由式(14)可知, 条纹数 $m = 26$ 条左右。

3) 光纤偏振控制器的原理

实际的光纤是非圆非均匀光波导, 存在双折射, 加之外界温度和应力的扰动, 导致光纤中传输光的偏振态发生变化, 对一段处于理想无扰动环境中的单模光纤来说, 存在可确定的偏振快慢轴。为了得到沿同一方向振动的线偏光, 需要用偏振控制器来调节出射光的偏振态及偏振方向。理论上任意椭圆偏振光经四分之一波片(波片光轴与椭圆偏振光长轴或短轴重合), 可变为线偏光, 线偏光经二分之一波片(偏振方向与波片快轴成 θ 角), 仍为线偏光, 方向偏转 2θ , 若再加一个四分之一波片, 则可将此线偏光改变为任意偏振态(椭圆偏振态, 圆偏振态, 线偏振态)的出射光。下图是偏振控制器的原理示意图和实物图, 本实验使用的偏振控制器由光纤绕制的两个等效四分之一波片和一个等效二分之一波片组成。

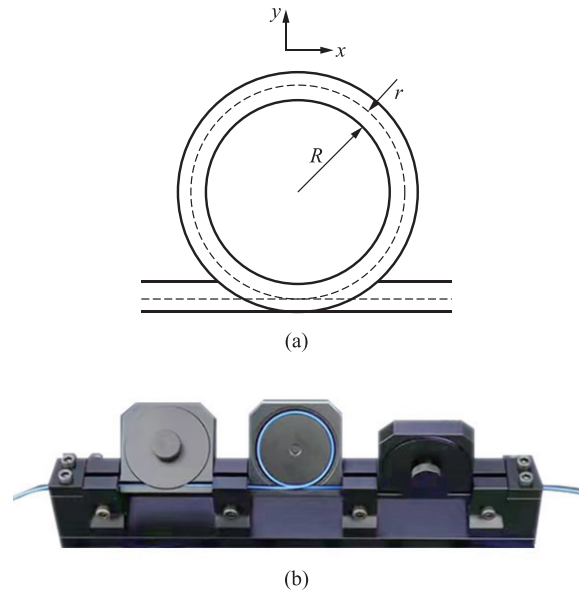


图4 偏振控制器
(a) 原理示意图; (b) 实物图

下面我们分析下环形光纤引入的正交偏振方向之间的相位差。假设光纤内沿 x, y 两个方向偏振光的折射率分别为 n_e 和 n_o (也可称之为非寻常光和寻常光的折射率), 在外部应力的作用下, 对应的折射率变化为

$$\begin{cases} \Delta n_x = n_e - n = \frac{n^3}{4} (p_{11} - 2\delta p_{12}) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \\ \Delta n_y = n_o - n = \frac{n^3}{4} (p_{12} - \delta p_{12} - \delta p_{11}) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \end{cases} \quad (15)$$

其中, n 为没有应力时的折射率; r 为光纤半径; R 为光纤弯曲半径; δ 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为与光弹性张量相关的量, 对石英光纤, $\delta = 0.16$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $n = 1.46$, 则

$$\begin{aligned}\Delta n_x &= 0.027 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \\ \Delta n_y &= 0.16 \left(\frac{r}{R} \right)^2\end{aligned}\quad (16)$$

记 $\delta n = n_e - n_o$, 则

$$\delta n = -\alpha \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (17)$$

且 $\alpha = 0.133$ 。从而得到光纤偏振控制器引入的相位差为

$$|\delta n| 2\pi NR = \left(\frac{\lambda}{m} \right) \quad (18)$$

当 $m = 2$ 或 4 时, 分别对应二分之一、四分之一波片。常用的光纤型偏振控制器多采用 3 个可以绕切线方向旋转的带有圆形槽的拨片来绕制光纤, 圈数比为 $1:2:1$ 。

4) 利用压电陶瓷环进行光纤相位调制的原理

利用压电陶瓷在电场的作用下发生形变的特点可以用来进行相位调制。将光纤绕紧固定在圆筒形压电陶瓷上, 当在筒壁的内外侧加上电压, 在电场的作用下, 陶瓷发生胀缩形变, 同时使得固定在它上面的光纤也发生伸缩形变, 即通过改变光程起到相位调制的作用, 光纤纵向长度发生变化的同时也改变了折射率, 折射率的变化由材料的泊松比决定。压电陶瓷(PZT)是 PbTiO_3 - PbZrO_3 的固溶体, 其逆压电效应: 当一块具有压电效应的晶体置于外电场中, 由于晶体的电极化造成的正负电荷中心位移, 导致晶体形变, 形变量与电场强度成正比。压电应变系数

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T \quad (19)$$

其中, S 为压电片产生的应变; T 为压电体的承受应力; $i = 1, 2, 3$, 表示电场方向; $j = 1, 2, 3, 4, 5$, 表示应变方向。将直流电压源通过导线加在压电陶瓷上, 通过调节旋钮将电压从低调到高, 同时观察条纹移动情况。图 5(a) 是干涉条纹, 为了使干涉条纹便于肉眼观察, 接收屏和光纤出射端面成一定夹角, 故干涉光斑为椭圆形。为了观察干涉条纹移动, 在接收屏上用黑色水笔画出一条参考线, 当固定 2 个光纤出射端和屏的位置只改变压电陶瓷驱动电压时, 可以明显看出条纹相对参考线移

动, 如图 5(b) 和 (c) 所示。

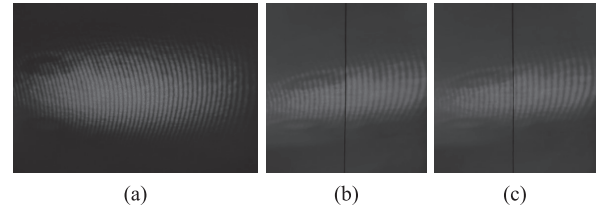


图 5 干涉条纹(a)和改变压电陶瓷驱动电压后的干涉条纹变化对比(b)和(c)

核心的干涉仪部分涉及光学领域关于波导、偏振方面的知识点, 以及力学和材料学领域应力应变相关的知识点。讲解的过程中教师要引导学生对知识点进行融会贯通, 例如光的偏振、电磁波的极化、示波器 XY 模式下显示的李萨如图形本质上是相通的。

1.2 实验教学的扩展知识部分

对于干涉仪相关的核心知识点以外的但与实验装置和操作相关的知识点作为扩展部分, 希望能在指导老师的引导下先由学生自己去思考探究, 再由老师补充总结。具体的实验相关的扩展知识点简述如下。

对于光源部分的扩展知识点例如激光器的基本原理、常用激光器的种类以及在各行业的应用情况(例如光通信、光感知、激光加工与测量等), 通常作者会提出一些问题来引导话题, 例如光也是电磁波, 为什么光学传感手段不受强电磁干扰? 引导学生回顾波动理论、电磁波谱相关的知识点。又如激光器的腔内的模式选择、相位匹配和弦产生的机械波驻波本质上是相通的, 鉴于实验装置使用半导体红光激光器作为光源, 这里一定要强调激光安全和用电安全, 因为养成好的实验习惯对于实验安全来说是非常重要的。

对于耦合装置, 引导学生思考光波导和光纤的常用耦合方式, 例如光纤拉锥和光栅耦合。这里还需要重点复习数值孔径的概念, 以及光波导传输模式的相关知识。在实验的操作过程中, 调整光学微调架和透镜是需要技巧和耐心的, 实验老师不能只是给学生演示怎么操作, 而是应该重点讲清楚需要使用实验仪器来完成什么样的工作, 达到什么样的效果, 应该让学生首先仔细观察实验装置同时思考为什么要用这样的实验装置来完成实验。例如, 本实验用到的光学微调架, 要让同学们了解其机械结构和调节范围的限制, 这样操作起来自然不盲目。有时候一些实验装置还会

发生故障或者损坏,这更是一个绝佳的教学机会,学生如果能够找到故障原因,即使在课堂时间内不能修复也会获得非常重要的实验经验。再者,老师在教学中发现,很多时候学生在做出一个实验后,有成就感的同时觉得有一种撞大运的感觉,这种感觉会干扰学生进一步拓展知识水平。这也从某些方面说明其对实验操作步骤没有理解深刻,因为在深刻理解每一步的底层逻辑后,做出现象是很自然的事情,甚至如果做不出来还可以指出是不是实验装置故障。总之,让学生了解实验装置以后,利用自己的知识完成实验操作比“照猫画虎”要有意义得多。耦合操作部分是将红色激光耦合进通信用的单模光纤,这里需要深入浅出地讲解光纤的材料和结构特点和所谓“单模”的定义,目的是让学生通过观察单模光纤中红光逸出的位置,利用红光在通信单模光纤中的传输特性来粗略估算耦合效果,在实际的工程应用中人们也经常会使用可见光波段的激光来检测光纤跳线的通断。

对于接收装置,引导学生从爱因斯坦的光电效应出发,思考光电探测器的材料体系和器件类型,并从应用角度给学生讲解光通信、传感、检测等领域使用的光电二极管、PD、APD、单光子计器、光电倍增管等传统光电探测器,还有基于石墨烯等新材料的新型光电探测器研究前沿,以及强光探测用的光热电探测器等其他技术路径。通过多领域的相关知识点融合对比讲解,使学生有可能构建一个光电探测应用领域的初步知识框架。而对于基础理论,则要让学生通过对比电频和光频的巨大差异来了解光探测和电探测本质的区别。对于光强可以从其基本定义即能流密度的角度出发,坡印廷矢量大小表示的是能流密度的瞬时值,这一数值以光的频率作周期性变化,光强是指能流密度的平均值,与传输介质的介电常数和磁导率有关,通常习惯使用电场的模方进行计算。此外,还可以进一步延伸到信息领域无线传输带宽和光通信传输带宽的巨大差距。

2 结论

综上所述,一个看似简单的光纤 Mach-Zehnder 干涉仪实验,如果经过细致的剖析和拓展,可以在

物理学的土壤里生长出许多理论的枝干和应用的叶片。在实验教学过程中,基于某个相关专业设计的物理实验,既要聚焦其核心知识点的基础理论分析和实际应用理解,又要在实验所涉及的相关领域内将底层理论具有相关性的知识点进行横向对照,将这些知识点“串起来”,以便于学生更深刻地理解这些物理现象的本质。实验教学最大的优势就是可以亲自动手体验一些物理现象,迅速对物理知识学以致用。而实验课堂这种面对面教学互动的方式可以用最快的速度发现并解答学生对专业知识点的疑问,高效率地达到教学目的,即让学生在实验过程中既动手又动脑,通过实验操作过程和实验结果分析加深印象,达到融会贯通实验相关物理知识,拓展完善自身物理知识体系的目的。

参 考 文 献

- [1] 谈宜东,徐欣,张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 228-249.
TAN Y D, XU X, ZHANG S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 228-249. (in Chinese)
- [2] 周宏强,赵崇利,满天龙,等. 正交偏振干涉的矢量光场分析和检测[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 114-119.
ZHOU H Q, ZHAO C L, MAN T L, et al. Vector light field analysis and detection of orthogonal polarization interference[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 114-119. (in Chinese)
- [3] 曾孝奇,邵明珍,杨珺,等. 光源尺寸对迈克耳孙干涉条纹可见度的影响[J]. 物理与工程, 2023, 33(6): 74-79.
ZENG X Q, SHAO M Z, YANG J, et al. Influence of light source size on the fringe visibility of Michelson interferometer[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(6): 74-79. (in Chinese)
- [4] 王凯,矫金龙,陈海. 浅谈工程物理[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 60-72, 80.
WANG K, JIAO J L, CHEN H. Introduction to engineering physics[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 60-72, 80. (in Chinese)
- [5] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
WU C Q. Theory of optical wave guides[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023. (in Chinese)