

文章编号: 1005-4642(2023)03-0029-07

学
生
园
地



从平面波的线性干涉到涡旋光的角向干涉

方涵宇^{1,2}, 张冬凯^{1,3}, 陈理想¹

(1. 厦门大学 物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005;

2. 福建省云霄第一中学, 福建 漳州 363300;

3. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 依托中学生“英才计划”课题, 以光场调控技术为选题, 开展了从平面波线性干涉到涡旋光角向干涉演化过程的实验教学. 从理论上模拟了涡旋光束与平面波的相干叠加, 通过数值分析确认了拓扑荷数与干涉条纹的关系. 实验上利用螺旋相位板制备涡旋光束, 并采用马赫-曾德尔干涉法观测光强分布图. 结果表明: 涡旋光束与平面波的相干叠加, 可以视为在线性干涉图样中移入与拓扑荷数相关的叉型条纹; 而具有相反拓扑荷数的涡旋光束的角向干涉图样, 则呈现与拓扑荷数相关的角向干涉条纹.

关键词: 线性干涉; 角向干涉; 涡旋光束; 马赫-曾德尔干涉仪; 英才计划

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.03.004

在中学物理中, 双缝干涉现象生动体现了光的波动性, 是引导学生感受光学魅力的入门章节. 但是在传统的课堂教学中, 由于实验条件的限制, 无法对双缝干涉实验进行现场演示. 这导致中学生对于光学干涉的认知停留于照本宣科的干涉条纹现象及结论, 即干涉条纹间距 Δy 与双缝间距 d , 双缝到光屏距离 z 及波长 λ 的关系为 $\Delta y = \frac{z}{d}\lambda$. 针对此问题, 厦门大学光场调控及量子信息实验室依托“英才计划”, 对中学生“英才计划”学员开展了“从线性干涉到角向干涉”的研究性教学实验, 以便构建更加高效合理的研究性实验教学课程. 通过理论与实验相辅相成的教学方法, 能够较大程度地弥补过去形式单一、内容枯燥的理论教学模式, 让学生在直观的实验现象中有效地吸收理论知识, 从而培养中学生的实验动手能力及对基础物理研究的兴趣和热情. 此外, 通过引入涡旋光束进行角向干涉实验, 学生能够切身感受到课本上的基础物理知识到国际前沿研究的科学实践的延伸过程, 这对于有效提高中学生

的科学素养具有重要的指导意义.

1 角向干涉实验教学

干涉是光波的固有属性, 干涉行为与光波空间相位分布密切相关. 光学干涉的课堂教学中通常假定入射光波为平面波. 1992 年, 荷兰 Leiden 大学的 Allen 等人^[1]从理论上发现了具有螺旋相位结构 $\exp(i l \phi)$ 的光束中平均每个光子携带有 $l\hbar$ 的轨道角动量, 其中 ϕ 为方位角, l 为拓扑荷数. 这类光束又称为涡旋光束^[2], 展现出了诸多新颖的现象、规律以及潜在的应用前景. 涡旋光束携带的轨道角动量可以传递给微粒, 因此可以作为光学扳手; 涡旋光束的拓扑荷数 l 理论上可取任意整数, 因此可以作为实现高维信息编码的载体. 因此, 涡旋光在光学微操纵、光信息传输、量子通信等领域中都具有重要的应用场景^[3-7].

涡旋光束的研究与应用都与其携带的拓扑荷数 l 密切相关, 对拓扑荷数的物理特性研究具有重要意义. 这恰好也是本实验教学的主要目的:

收稿日期: 2022-03-14; **修改日期:** 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 12034016); 中国科协“英才计划”; 厦门大学南强青年拔尖计划

作者简介: 方涵宇(2003—), 男, 福建漳州人, 福建省云霄第一中学高中生, 现为上海交通大学物理与天文学院理科试验班 2021 级本科生. E-mail: aurora_superposition@sjtu.edu.cn

通信作者: 张冬凯(1992—), 男, 福建厦门人, 华侨大学信息科学与工程学院讲师, 博士, 研究方向为光量子调控. E-mail: zhangdk@hqu.edu.cn

陈理想(1981—), 男, 福建厦门人, 厦门大学物理科学与技术学院教授, 博士, 研究方向为光场调控、量子成像等. E-mail: chenlx@xmu.edu.cn

利用光学干涉法研究平面波和涡旋光束之间的干涉效应,并分析干涉条纹与拓扑荷数的定量关系.2010年,Leach等人^[8]从实验上阐述了拓扑荷数与角度是1对共轭力学量,这说明涡旋光束的干涉条纹与方位角相关,因此从平面波的干涉到涡旋光束的干涉可理解为光波空间相位从线性干涉到角向干涉的过程.

本文依托中国科协中学生“英才计划”课题,基于光场相位调控的干涉效应的选题,通过 Matlab 数值模拟和马赫-曾德尔干涉法,在理论上和实验上介绍了平面波与涡旋光束的线性干涉和角向干涉的教学设计.因此,该研究性教学实验既能丰富学生对光场相位调控技术的基本认知以及对光波干涉特性的感性认识,也能为物理学专业拔尖人才和未来青年物理学家的科学素养和实验技能提供重要的培养模式.

2 理论分析与数值模拟

2.1 平面光波线性干涉的光场分布

激光出射的光场可近似看成高斯平面波,光场分布可表示为 $E = A \exp(ikx)$, 其中, A 为振幅, k 为沿 x 方向的横向波矢. 因此, 2 束平面波 $E_2 = A_2 \exp(ik_2x)$ 和 $E_1 = A_1 \exp(ik_1x)$ 的干涉光强为

$$I = |E_1 + E_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[(k_2 - k_1)x], \quad (1)$$

假设 2 束光都是单位振幅, 即 $A_1 = A_2 = 1$, 并且横向波矢满足 $k_2 = -k_1 = k$ 时, 则

$$I = 2 + 2\cos(2kx). \quad (2)$$

由式(2)可看出: 当 $2kx = 2m\pi$ 时, 干涉强度为极大值; 当 $2kx = 2(m+1)\pi$ 时, 干涉强度为极小值. 干涉光场的强度分布由式(2)的取值决定. 因此, 平面光波干涉结果是线性干涉, 干涉图样为明暗相间的线性条纹, 在理论上可以通过 Matlab 进行干涉图样的模拟, 结果如图 1 所示.



(a) 模拟 (b) 实验

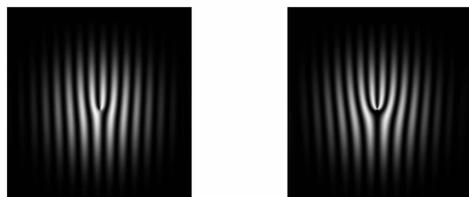
图 1 平面光波线性干涉条纹

2.2 涡旋光与平面波倾斜干涉的光场分布

涡旋光束的电场具有螺旋相位, 可表示为 $E_3 = A_3 \exp(il\phi)$, 其中 A_3 为振幅, ϕ 为极坐标系下的方位角. 同样假设 A_1 和 A_3 为单位振幅, 则倾斜平面波与涡旋光的干涉光强为

$$I = |\exp(ik_1x) + \exp(il\phi)|^2 = 2 + 2\cos(k_1x - l\phi). \quad (3)$$

根据式(3)可以模拟出平面波与涡旋光束倾斜干涉的图样, 结果如图 2 所示. 此时的干涉条纹不再是明暗相间的竖直条纹, 而是在干涉图样的中心呈现出与拓扑荷数相关的叉型条纹^[9-10]. 由图 2(a)~(d)可以看出叉型条纹的数量取决于拓扑荷数 l 的取值, 即 $N = |l| + 1$, 其中 N 为分叉数. 而通过图 2(a)~(d)与图 2(e)~(h)的对比可以得出叉型的取向与 l 的符号相关, 即 $l > 0$, 干涉条纹的分叉朝上; $l < 0$, 干涉条纹分叉朝下. 与图 1 的线性条纹相比, 涡旋光束与平面波的干涉条纹的中心位置呈现出明显的拓扑荷数特征, 又称为叉形光栅结构, 因此实验上也通常利用该干涉方法来测量涡旋光束的拓扑荷数.



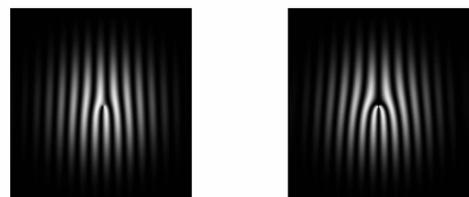
(a) $l=1$

(b) $l=2$



(c) $l=3$

(d) $l=4$



(e) $l=-1$

(f) $l=-2$

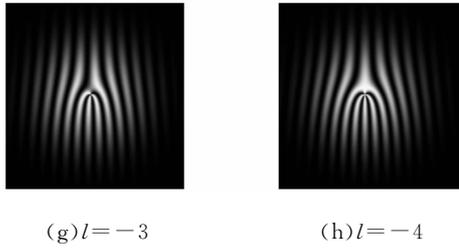


图 2 平面波与涡旋光的倾斜干涉模拟结果

2.3 拓扑荷数为 ±l 的涡旋光束角向干涉的光场分布

2 束涡旋的干涉会出现明显的环形干涉图样. 选取具有相反拓扑荷数的涡旋光束作为研究对象. 拓扑荷数分别为 ±l 的涡旋光叠加后的干涉光强为

$$I = |\exp(i l \phi) + \exp(-i l \phi)|^2 = 2 + 2 \cos(2 l \phi), \quad (4)$$

根据式(4)可以看出:光强随方位角 ϕ 呈现余弦变化规律,且变化周期由拓扑荷数 l 决定^[11-13]. 具体地说,角度 ϕ 在横截面内转动 1 圈,将呈现 $2l$ 个余弦周期变换,每个周期光强均从最大值变换到最小值. 如图 3 数值模拟结果所示,与式(2)的线性干涉进行类比,可以看到图 3 的干涉条纹沿着角向呈现周期性变化,因此称为角向干涉.

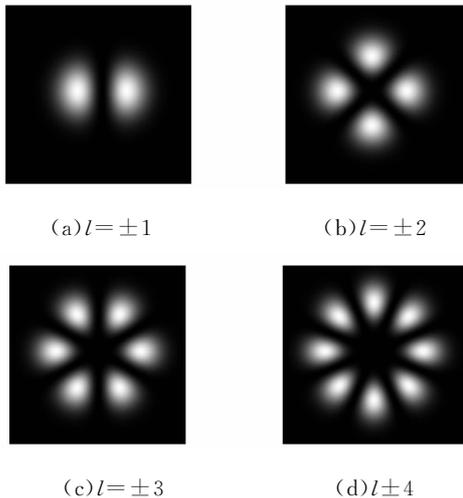


图 3 拓扑荷数 ±l 涡旋光角向干涉的模拟结果

3 实验方法

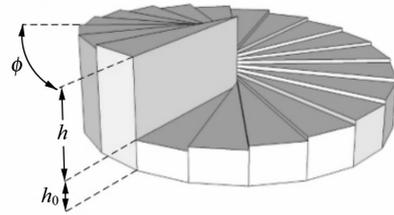
3.1 涡旋光束的制备

实验中使用螺旋相位板(VPP)来获取涡旋光束,螺旋相位板法的转换效率高,可以快捷地制备整数涡旋光束. 其主要原理是利用随方位角周期变化的相位板对平面波前引入螺旋相位,继而生

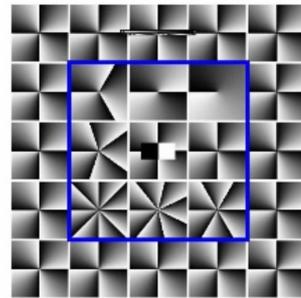
成涡旋光束. 如图 4 所示,螺旋相位板的一面具有旋转阶梯式的螺旋结构,其厚度 h 与方位角 ϕ 具有以下关系^[14]: $h = h_0 + \frac{h\phi}{2\pi}$, 其中 h_0 为螺旋相位板的基础厚度, h 为旋转阶梯总厚度, n 为螺旋相位板的折射率. 设周围环境介质(如空气)的折射率为 n_0 , 则波长为 λ 的激光透射过该螺旋相位板时,出射光与入射光产生的相位延迟为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{(n-n_0)h\phi}{2\pi} + nh_0 \right], \quad (5)$$

可以看出,该螺旋相位板可产生拓扑荷数 $l = (n - n_0)h/\lambda$ 的涡旋光束.



(a)螺旋相位板 VPP 的结构示意图



(b) RPC Photonics 公司的产品 VPP-m633

图 4 螺旋相位板的结构

3.2 马赫-曾德尔干涉法

实验采用最常用的干涉方法——马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉法. 马赫-曾德尔干涉仪由 2 个 50 : 50 分束器(BS)和 2 个反射镜(M)构成,其优点是实验方法较为简便,可以直接用 CCD 相机进行观测. 利用图 5 所示的实验装置可以观测平面波与涡旋光的倾斜干涉. He-Ne 激光器产生波长为 632.8 nm 的基模高斯光束,并通过分束器(BS₁)分成等光强的 2 束光. 其中一路通过涡旋相位板(VPP)产生携带特定拓扑荷数的涡旋光束,并与另一路的平面光波在第 2 个分束器(BS₂)处干涉,可以通过调节平面光束到达 BS₂ 的倾斜角来调整二者的倾斜干涉,从而获得具有

特定叉形光栅结构的干涉条纹,并通过 CCD 相机进行采集和观测.

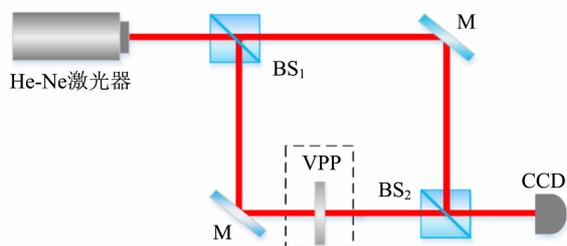


图 5 马赫-曾德尔干涉仪实现平面波与涡旋光倾斜干涉的实验装置光路图

4 实验过程及结果分析

4.1 涡旋光与平面波倾斜干涉的实验结果

首先移除图 5 实验装置中的 VPP,并利用 CCD 观测平面波与平面波的线性干涉现象,以便验证实验装置的可行性. 实验结果[图1(b)]与理论模拟[图1(a)]非常吻合,为明暗相间的线性条纹,同时也证明了实验装置的稳定性和可行性.

接着放入 VPP 观测涡旋光与平面波的倾斜干涉现象. 实验上使用的 VPP 是 RPC Photonics 公司的 VPP-m633, 高斯光束通过其中间的不同区域可分别产生拓扑荷数 $l=1\sim 8$ 的涡旋光束. 实验中其中一路制备了拓扑荷数分别为 $l=-4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4$ 的涡旋光束, 并与另一路的平面波进行倾斜干涉. CCD 相机记录的实验结果如图 6 所示, 此时观测到的干涉条纹呈现出与拓扑荷数对应的叉型干涉结构, 并且叉形的取向与拓扑荷数的正负号相关, 这与图 2 的数值模拟结果基本一致.

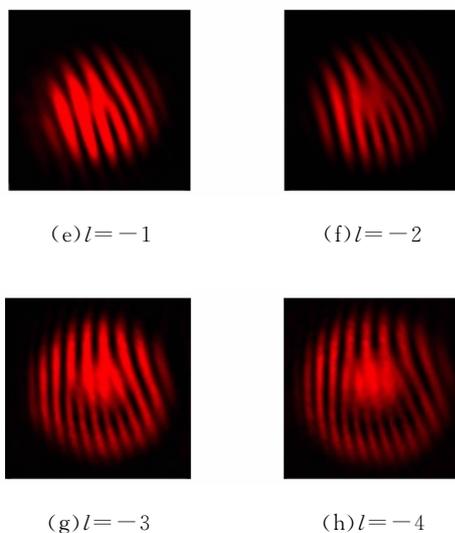
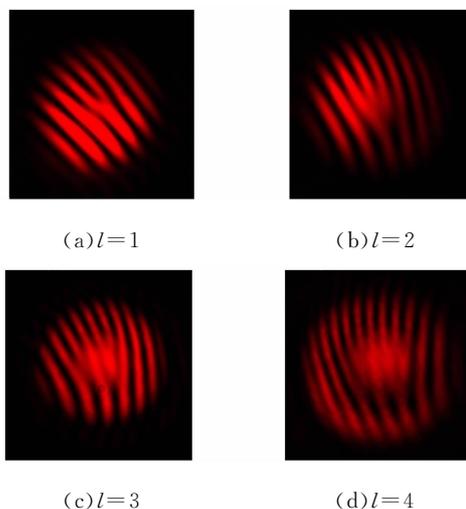


图 6 涡旋光与平面波倾斜干涉的实验结果

4.2 拓扑荷数为涡旋光角向干涉的实验结果

将 VPP 放在 He-Ne 激光器后面,直接产生拓扑荷数 $l=1, 2, 3, 4$ 的涡旋光,并在马赫-曾德尔干涉仪的一路中放入道威棱镜(Dove Prism, DP)来实现 $\pm l$ 涡旋光束的干涉,实验装置如图 7 所示. 道威棱镜 DP 的作用为在不改变光学传播路径的前提下,实现涡旋光束拓扑荷数符号从 $+l$ 到 $-l$ 的转变^[15]. 这是因为涡旋光拓扑荷数的符号取决于涡旋光束在传播方向上的旋向(左旋与右旋),而光波在 DP 内部传播经历了 1 次额外镜面反射,从而导致旋向的改变.

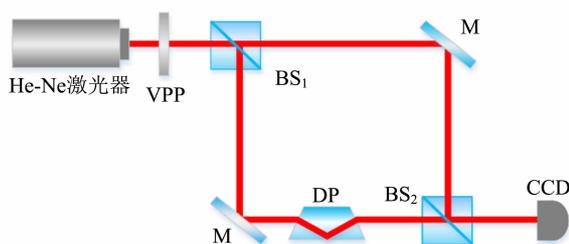
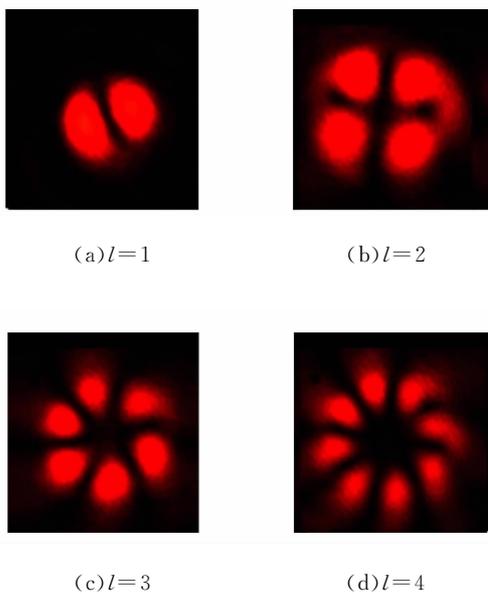


图 7 马赫-曾德尔干涉仪实现拓扑荷数 $\pm l$ 的涡旋光角向干涉的实验装置图

在实验中,拓扑荷数为 l 的涡旋光进入干涉仪后,放置了 DP 一臂的拓扑荷数变成了 $-l$,而另外一臂保持 l 不变,因此在 BS₂ 处能够实现拓扑荷数为 $\pm l$ 涡旋光的角向干涉,CCD 相机记录的实验结果如图 8 所示. 角向干涉图样的条纹数恰好为 $2l$, 犹如盛开的花瓣,这与理论模拟结果图 3 基本一致.

图8 拓扑荷数 $\pm l$ 的涡旋光角向干涉的实验结果

5 角向干涉实验的教学方法

5.1 理论与实验教学

教学内容将根据2~4节的理论推导、模拟及实验搭建、测量展开,具体可细分为9个部分,如表1所示。其中理论学习包含线性干涉与角向干涉的理论推导、干涉强度图(图1~3)的模拟仿真;光路调节与实验测量内容是在教师的指导下,学生自主搭建图5和图7的实验装置图,并使用CCD相机拍出图1(b)、图6和图8的干涉强度图。最后进行实验数据整理与分析,即通过Visio软件将实验结果与理论模拟结果对比,观察实验拍摄结果与理论模拟是否一致,得到干涉条纹与涡旋光束拓扑荷数的关系。

表1 角向干涉研究实验的进度安排

周次	教学内容
1	绪论
2~3	相关理论学习、文献调研
4~5	螺旋相位板和道威棱镜的使用
6~7	光路调节
8	光路调节指导
9~11	光路优化
12~13	线性干涉强度测量
14~15	角向干涉强度测量
16	实验结果整理与分析

5.2 教学过程中遇到的问题及解决方法

在教学过程中,由于中学生的理论知识和动手能力都相对薄弱,无法按照研究生培养模式进行教学。对中学生的实验教学必须因材施教,结合高中物理知识进行形象的描述,以便学生能够在现有的知识体系下系统地学习干涉实验内容。在理论方面,由于中学生的物理理论相对局限,无法通过光场分布的表现形式来解释涡旋光束,因此可以适当引用高中课程中一些简单的物理概念进行直观的描述。以拓扑荷数为1的涡旋光束为例,可以结合高中的圆周运动以及旋转楼梯向学生描述:当行人从旋转楼梯往上走,其行为可以看作是在 $x-y$ 面内做圆周运动,同时在 z 轴平移。若将每层楼之间看做1个周期,并且在1个周期内行人在 $x-y$ 面内回到原点,则此时对应拓扑荷数为1的涡旋光束相位结构。

在实验操作方面,难点集中于VPP的使用以及2束光在 BS_2 中的合束。实验中使用的VPP如图4(b)所示,每个小方格对应1个拓扑荷数。在实际操作中,当且仅当小方格的中心严格对准光束中心时才能产生较为完美的涡旋光束,但由于VPP是透明的光学元件,无法通过肉眼看到小方格的中心,因此需要通过观察透射光的光强分布来进行实时的微调操作。为了让学生更加形象地了解调节过程中光强分布的变化,可以通过Malab软件进行模拟仿真。小方格中心逐渐接近光束中心的过程中,光强分布将从高斯分布逐渐变化为高斯光束与涡旋光束的叠加,最终转换为完整的涡旋光束。整个过程如同1个暗斑逐渐靠近光束中心,如图9所示,因此学生能够根据透射光的光强分布来实时调节VPP的位置。

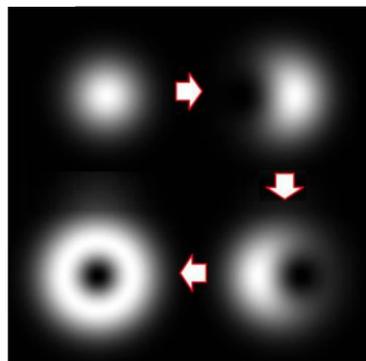


图9 VPP调节过程光强的变化

此外,如何使 BS_1 分束器分出的 2 束光在 BS_2 分束器进行合束,也是实验操作的主要难点之一,这是因为当且仅当 2 束光在 BS_2 的中间斜面上完全重合时才能观测到完整的干涉现象.为此,可以让学生在草稿纸上绘画光路图,并与实际光路结合,思考合束的关键点.经过多次绘画梳理,可以总结出 2 个关键点:1)需要保证光束在传播过程保持准直,使得 2 束光到交汇点保持在同一高度.此时可以引导学生先将 BS_2 移开,并将纸片放置在 BS_2 的位置,观察 2 束光是否能够完全重叠;2)在保证 2 束光能够完全重叠的基础上,让 BS_2 先与一路光束对齐,并缓慢向另一路光束靠近,从而通过观察干涉现象找到干涉效果最好的位置,如图 10 所示.

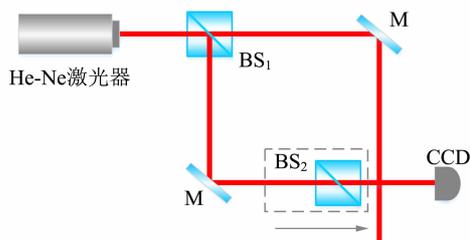


图 10 BS_2 合束的实验调节方法

5.3 教学评价

本教学实验内容的精髓在于能够充分体现理论与实践相统一的方法论原则.一方面,只有理论基础扎实的学生才能够在调节光学元件的过程中获得实时的反馈,即根据透射光强分布情况判断光路调节是否正确以及具体调节进程;另一方面,光强分布的变化过程又能够反过来加强学生对理论知识的理解.理论与实验相辅相成的研究过程能够让学生明白在科学研究过程中,不仅要掌握扎实的实验技能,还需要有深厚的理论知识作为指导,从而使学生明白相对枯燥的理论知识并非学而无用,而是为更深入的科学实验研究奠定基础.从这个角度看,该实验教学能够较好地激发学生对科学研究的兴趣,并将所学的理论知识灵活运用在实验操作中,从而有助于促进学生更加重视基础物理内涵的理解.

与此同时,实验教学也需要改进:其一,在实验教学中容易忽略一些较为重要的基础光学知识的相关讲解.例如,中学生缺乏对振幅相位组成的复数形式的认知,教师没有从全息成像的角度

给学生直观地描述复数空间的物理图像;在干涉现象的解释中,教师忽略了对光束相干性的讲解,没有着重解释光学干涉所需的 3 个条件:同方向、同频率和恒定相位差.其二,教学内容应进一步开展实验结果的扩展分析,即根据实验结果引导学生从涡旋光束的拓扑荷数与干涉现象的对应关系中总结涡旋光束的应用场景.

6 结 论

本文以中学生“英才计划”课题为依托,以基于光场相位调控的干涉效应为选题,从平面波的光学线性干涉现象入手,引入了具有角向自由度的涡旋光束,结合 Matlab 软件模拟仿真,在实验室利用马赫-曾德尔干涉仪结合螺旋相位板 VPP,演示了从平面波的线性干涉、平面波与涡旋光的倾斜干涉到涡旋光与涡旋光的角向干涉过程,得到了拓扑荷数与干涉条纹的具体关系.研究表明:平面波与涡旋光束的倾斜干涉呈现出与拓扑荷数对应的叉型干涉条纹,即分叉数量为 $|l|+1$,分叉开口方向与拓扑荷数的符号对应.此外,拓扑荷数分别为 $\pm l$ 的涡旋光束干涉,可以得到条纹数为 $2l$ 的角向干涉图样.可以看出涡旋光束的拓扑荷数并不仅仅是概念上的数学参量,还是具有角向特征的物理参量,并且可以通过光学干涉法定量地描述及表征.本文理论模拟及实验工作在导师指导下均由“英才计划”学生亲自完成,包括数学建模编程、实验光路搭建、实验数据采集及实验结果分析.通过将光场调控领域比较成熟的平面波之间的干涉、平面波和涡旋光的干涉,以及涡旋光与涡旋光之间的干涉等光学现象进行对比梳理、综合分析,丰富了学生对光波相位的概念及光干涉原理的理性认识,并为“英才计划”学生未来从事基于光场调控及其光量子信息技术等领域的相关研究提供了有趣的研究课题以及重要的培养模式.

参考文献:

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Bazhenov V Y, Vasnetsov M V, Soskin M S. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts

- [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1990,52(8):429.
- [3] Padgett M J, Courtial J, Allen L. Light's orbital angular momentum [J]. *Physics Today*, 2004, 57(5):35.
- [4] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L. Twisted photons [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(12):305-310.
- [5] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities [J]. *Light: Science & Applications*, 2019,8(1):339-367.
- [6] 杨伟东,邱晓东,陈理想. 轨道角动量分离、成像、传感及微操控应用研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5):207-223.
- [7] 陈理想,张远颖. 光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展[J]. *物理学报*, 2015, 64(16):73-85.
- [8] Leach J, Jack B, Romero J, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables [J]. *Science*, 2010, 329(5992):662-665.
- [9] Bazhenov V Y, Vasnetsov M V, Soskin M S. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts [J]. *JETP Letters*, 1990,52(8):429-431.
- [10] White A G, Smith C P, Heckenberg N R, et al. Interferometric measurements of phase singularities in the output of a visible laser [J]. *Journal of Modern Optics*, 1991,38(12):2531-2541.
- [11] Harris M, Hill C A, Tapster P R, et al. Laser modes with helical wave fronts [J]. *Physical Review A*, 1994,49(4):3119-3122.
- [12] Padgett M, Arlt J, Simpson J, et al. An experiment to observe the intensity and phase structure of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *American Journal of Physics*, 1996,64(1):77-82.
- [13] Chen L, Zhang W, Lu Q, et al. Making and identifying optical superpositions of high orbital angular momenta [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(5):053831.
- [14] Zhang W, Qi Q, Zhou J, et al. Mimicking Faraday rotation to sort the orbital angular momentum of light [J]. *Physical Review Letters*, 2014,112:153601.
- [15] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. *Optics Communications*, 1994,112(5/6):321-327.

From linear interference to angular interference

FANG Hanyu^{1,2}, ZHANG Dongkai^{1,3}, CHEN Lixiang¹

(1. College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Yunxiao No. 1 Middle School of Fujian, Zhangzhou 363300, China;

3. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Supported by “YINGCAIJIHUA” program, the experimental teaching of the evolution process from the plane wave linear interference to angular interference of vortex light was carried out with the light field regulation technology as the topic. The theoretical simulation showed the coherent superposition of a plane wave with vortex beams and confirms the relationship between the topological charges and the interference fringes by numerical simulation. In experiment, the vortex phase plates were used to produce the vortex beams, and the modified Mach-Zehnder interferometer was employed to measure the interference intensity patterns. It was confirmed that the tilted interference of the vortex beams with a plane wave added a forked structure to the linear fringes. While for two vortex beams with the opposite topological charges, it exhibited an interference pattern of angular petals, and the petal number was related to the topological charges.

Key words: linear interference; angular interference; vortex beams; Mach-Zehnder interferometer; “YINGCAIJIHUA” program

[责任编辑:郭伟]