

多场景光子晶体全息制作虚拟仿真实验的设计*

戚志明¹, 梁文耀²

1. 广东开放大学, 广东 广州 510091
2. 华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640

摘要: 光子晶体是类比晶体结构制作的人工电磁材料, 被称为光子半导体。本文利用全息干涉原理设计了二维简单、二维复式和三维简单等多种晶格类型光子晶体的实验光路, 并采用Unity、C#、3dsMax等计算机工具开发了上述三种场景的虚拟仿真实验平台。该平台能够实现虚拟激光的产生、传播和再生, 以及光束的自动反射、分束等功能, 而且支持不同类型光子晶体制作光路的自由设计, 具有形象直观、调节方便、图案丰富、低成本、开放性强等优点。

关键词: 光子晶体; 多场景; 全息制作; 虚拟仿真

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)04-0149-09

Design of virtual simulation experiment for multi-scene photonic crystal holographic fabrication

QI Zhiming¹, LIANG Wenyao²

1. The Open University of Guangdong, Guangzhou 510091, China
2. School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract: Photonic crystal (PC) are artificial electromagnetic material realized by analogy with crystal structures, known as photonic semiconductors. The experimental optical paths of two-dimensional simple triangular PC, two-dimensional complex square PC, and three-dimensional simple PC have been designed by using multi-beam holographic interferometric method in this paper. The multi-scene virtual simulation experimental platform is developed by using computer tools such as Unity, C#, and 3dsMax comprehensively. This virtual platform can realize the generation, propagation, and regeneration of virtual laser, as well as the automatic reflection, splitting and other functions of the virtual laser beam. Besides, it also supports the arbitrary design of optical path for forming various PC. Such virtual experimental platform possesses the advantages of figurative, intuitive, convenient control, rich patterns, low cost, and strong openness.

Key words: photonic crystal; multi-scene; holographic fabrication; virtual simulation

* 收稿日期: 2024-03-24 录用日期: 2024-04-19 网络首发日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(12074127); 广东省自然科学基金(2023A1515010951);
广东省高等教育教学改革项目(x2wl/C9233016)

作者简介: 戚志明(1979年生), 女; 研究方向: 全息光学、计算机应用;
E-mail: zmqi@gdrtvu.edu.cn

通信作者: 梁文耀(1981年生), 男; 研究方向: 光子晶体、拓扑光子学;
E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

全文阅读



ZR20240084

光子晶体是一种能够在亚波长尺度上灵活操控电磁波行为的人工微结构(Joannopoulos et al., 2008), 通常由介质或金属材料在空间上周期排列而成, 被誉为光子半导体, 其拥有光子带隙(Wu et al., 2022)、负折射(Zhou et al., 2022)、超准直(Xia et al., 2022)、慢光(Li et al., 2023a)等丰富的物理效应, 在光集成、光通信和光存储等领域拥有广阔的应用前景。在光子晶体制备方面, 研究者提出了半导体微机械加工法(Yablonovitch et al., 1991)、逐层叠加法(Aeby et al., 2021)、自组装机法(Cai et al., 2021)、飞秒激光直写法(Tian et al., 2023)、激光全息干涉法(Sun et al., 2015; Lü et al., 2017; Xiong et al., 2021; Li et al., 2023b)等, 为不同维度和不同应用场景的光子晶体制备提供了有效的解决方案。其中, 激光全息干涉法因其具备大面积、图样丰富、成本低、形象直观等一系列优点, 已成为光子晶体制备的重要手段。

光学全息的概念由匈牙利科学家 Garbar 提出, 它是一种利用光束干涉将物体的全部三维信息(包括振幅、相位和强度)记录下来的技术。随着激光技术的不断发展, 激光全息技术已成为现代光学的重要工具, 应用于三维显示、光学加密、信息存储、光子晶体制备等领域(董建文等, 2014; Biswas et al., 2023; 胡德骄等, 2023)。在光子晶体激光全息制作方面, 主要包括多光束全息干涉和计算全息两类。其中, 前者通过设计光路将激光分为若干子光束再汇聚以产生干涉图案, 进一步采用单步或多步曝光方法制备各种微结构, 利用该方法已成功制备周期光子晶体(戚志明等, 2014; Hurley et al., 2023)、准周期光子晶体(Boxer et al., 2022)、亚波长光学结构(Huang et al., 2012)等微结构; 后者是近年发展起来的新兴技术, 它将光学全息和计算机技术结合起来, 利用计算机模拟光学全息过程, 通过编码生成数字全息图, 最后用光学方法再现或制作人工微结构(梁艳明等, 2010; Liu et al., 2013; 刘娟等, 2023; Yao et al., 2024)。由于多光束全息干涉法不仅能够产生不同维度、不同类型的人工微结构, 而且通过灵活调节光束偏振可实现不同元胞形状的丰富图案, 因此本文运用这一方法设计多场景光子晶体全息制作虚拟实验。

物理实验作为高校理工科的专业基础, 其内容主要为力、热、光、电、磁、原子物理等相关学科的经典实验。然而, 由于种种原因, 物理实验内容缺乏有效和及时的更新, 难以反映当代物理学、光学等学科前沿的研究成果。虚拟仿真技术作为新兴工具, 在物理实验中开始扮演越来越重要的角色(梁文耀等, 2021)。近年来, 武汉大学开发了康普顿散射虚实仿真实验平台(杨智慧等, 2021), 吉林师范大学开发了超高压物理实验技术虚拟仿真实验平台(张勇等, 2022), 华东师范大学基于 Unity 软件构建了虚拟仿真实验场景动态仿真光波的等倾和等厚干涉现象(邓莉等, 2022), 华南理工大学建立了散裂中子源虚拟仿真实验平台并投入了使用(马佳洪等, 2023)。尽管虚拟仿真实验取得了一些进展, 但仍存在虚拟实验内容与物理学前沿脱节、虚拟实验互动性不足等制约。本文将光子晶体全息干涉制作理论引入物理实验, 开发了二维简单晶格、二维复式晶格、三维简单晶格光子晶体等多场景全息制作虚拟仿真实验平台, 以达到为虚拟仿真和物理实验融合奠定基础的目的。

1 多光束干涉及光子晶体全息制作

1.1 多光束干涉原理

多光束干涉原理是光子晶体全息制作的物理基础。假定有 N 束等强度的相同频率平面波在空间特定区域发生干涉, 则其光强分布为

$$\begin{aligned} I(\mathbf{r}) &= \left| \sum_{m=1}^N \mathbf{E}_m \exp(i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r} + \delta_m) \right|^2 \\ &= N |\mathbf{E}_m|^2 + \sum_{m \neq n}^N \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{E}_n^* \exp[i(\mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n) \cdot \mathbf{r} + (\delta_m - \delta_n)] \\ &= N |\mathbf{E}_m|^2 + \sum_{m \neq n}^N \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{E}_n^* \exp[i\mathbf{G}_{mn} \cdot \mathbf{r} + \delta_{mn}], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{E}_m \exp(i\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r} + \delta_m)$ 为第 m 束光的平面波表达, \mathbf{k}_m 、 \mathbf{E}_m 、 δ_m 分别为第 m 束光的波矢、电矢量、初相位。 $\mathbf{G}_{mn} = \mathbf{k}_m - \mathbf{k}_n$ 为波矢差, $\delta_{mn} = \delta_m - \delta_n$ 为初相位差。由(1)式可知, 多光束干涉的空间分布具有周期性特征, 可用来制作光子晶体、人工超材料等各种周期微结构, 其对比度、元胞形状和参与干涉光束的振幅强度、偏振组合(如 $\mathbf{E}_m \cdot \mathbf{E}_n^*$)等密切相关。

1.2 光子晶体全息制作

通过类比晶体结构, 光子晶体可分为仅含一套晶格的简单光子晶体和含多套简单晶格的复式光子晶体。以简单光子晶体为例, 根据固体物理理论(黄昆原等, 1988), 一维周期结构仅在一个维度上具有周期性, 如多层周期薄膜结构。二维周期结构在2个维度上具有周期性, 共包括4种晶系(斜方、矩形、三角和正方)和五种布拉维格子(即简单斜方、中心长方、简单长方、简单六角、简单正方)。三维周期结构则更为复杂, 在3个空间维度上具有周期性, 包括7大晶系(即三斜、单斜、正交、四角、立方、三角和六角)和14种布拉维格子。

多光束干涉图样的空间分布与光束构型(即光束数量、光束方向等)密切相关。对于 N 束非共面相干光, 当它们汇聚于同一区域时将产生复杂的干涉条纹。为便于分析起见, 可以按照先两两干涉、后统一叠加的方法进行分解。 N 束光两两干涉的波矢差总数量为 $\frac{N(N-1)}{2}$ 。当仅有2束光干涉, 有且仅有单个波矢差 $\mathbf{G}_{12} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, 其干涉结果为垂直于波矢差的一组平行平面, 即一维周期微结构。当 $N = 3$ 时, 共有3个波矢差 $\mathbf{G}_{12} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$ 、 $\mathbf{G}_{23} = \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3$ 和 $\mathbf{G}_{31} = \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_1$, 它们首尾相连构成一个三角形, 满足 $\mathbf{G}_{12} + \mathbf{G}_{23} + \mathbf{G}_{31} = 0$, 因此仅有两个独立基矢, 其干涉图样为二维简单晶格周期微结构。当 $N = 4$ 束时, 此时有6个波矢差 $\mathbf{G}_{mn}(m, n = 1 \sim 4, \text{且} m \neq n)$, 这需要进行进一步分两种情况进行讨论。第1种是所有波矢差 \mathbf{G}_{mn} 均共面, 此时任意两个波矢差均可产生一套二维简单晶格, 它们彼此叠加形成二维复式晶格光子晶体; 第2种情况是各波矢差不共面, 此时任意两个波矢差产生的二维简单晶格的法线取向通常各不相同, 它们彼此叠加形成三维晶格光子晶体。当光束数量 $N \geq 5$ 时, 将产生更加复杂的二维或三维复式光子晶体结构。

为了利用多光束干涉法制作光子晶体, 首先需要确定光束构型。下面以二维简单三角晶格光子晶体为例进行说明。

(1) 由于二维简单晶格只有2个自由度, 因此需要3束非共面干涉光, 从三角晶格的布拉维格子基矢 $\{\mathbf{a}_k\}(k = 1, 2)$ 出发, 推导倒易空间(即 \mathbf{k} 空间)的倒格子基矢 $\{\mathbf{b}_l\}(l = 1, 2)$ 。根据正、倒易空间的

变换关系 $\mathbf{a}_k \cdot \mathbf{b}_l = 2\pi\delta_{kl}$ ($k = l$ 时 $\delta_{kl} = 1$; $k \neq l$ 时 $\delta_{kl} = 0$), 可得到三角晶格在倒易空间的基矢 $\{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2\}$;

(2) 在波矢差 \mathbf{G}_{mn} 中选择2个波矢差与 $\mathbf{b}_l(l = 1, 2)$ 进行一一对应, 利用它们的干涉产生周期微结构。需要指出的是, 对于周期结构而言, 除了与 $\{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2\}$ 对应的基本波矢差之外, 其他“多余”的波矢差 \mathbf{G}_{mn} 属于非基本倒格矢, 其干涉不会破坏晶格的平移对称性;

(3) 选择合适的位置作为坐标原点建立直角坐标系, 确定各光束构型的几何参数, 为后续研究提供参考。其他类型或复式光子晶体可按此方法类似分析, 在此不再赘述。

2 三种光子晶体光束构型设计

选取三种典型光子晶体, 即二维简单、二维复式和三维简单晶格光子晶体进行研究, 它们的光束构型如图1(a)、图1(b)和图1(c)所示。对于任意一束相干光, 其传播方向由极角和方位角给出, 其电矢量振动方向(即偏振方向)位于垂直于传播方向的平面上, 具体可分为线偏振、椭圆偏振或圆偏振, 可将各偏振 \mathbf{E}_m 进一步分解为振动方向彼此垂直、且相位差恒为 90° 的两个分量(对应椭圆长、短轴的 \mathbf{E}_{ma} 、 \mathbf{E}_{mb}) (Mao et al., 2005), 即

$$\begin{cases} \mathbf{E}_m = \mathbf{E}_{ma} + \mathbf{E}_{mb}, \\ \mathbf{E}_{ma} = E_{ma} \exp[i(\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})] \mathbf{e}_{ma}, \\ \mathbf{E}_{mb} = E_{mb} \exp\left[i\left(\mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \mathbf{e}_{mb}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 \mathbf{E}_{ma} 的单位方向矢量 \mathbf{e}_{ma} 定义为垂直于 \mathbf{k}_m 的平面与 xoy 平面的交线, \mathbf{E}_{mb} 由 $\mathbf{E}_{mb} = \mathbf{k}_m \times \mathbf{E}_{ma}$ 给出。

2.1 二维简单晶格

由前面讨论可知, 产生二维简单晶格仅需3束相干光, 其光束构型见图1(a), 具体参数见表1。其中 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ 围绕 z 轴对称分布, 极角均为 30° , 方位角分别为 $180^\circ, -60^\circ, 60^\circ$, 它们的波矢差 $\mathbf{k}_{31}, \mathbf{k}_{21}, \mathbf{k}_{23}$ 构成正三角形, \mathbf{k}_1 为圆偏振光, $|\mathbf{E}_a| = |\mathbf{E}_b| = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ 均为沿 \mathbf{E}_a 方向的线偏振光。它们干涉产生的是二维简单三角晶格, 数值仿真结果如图1(a')所示。

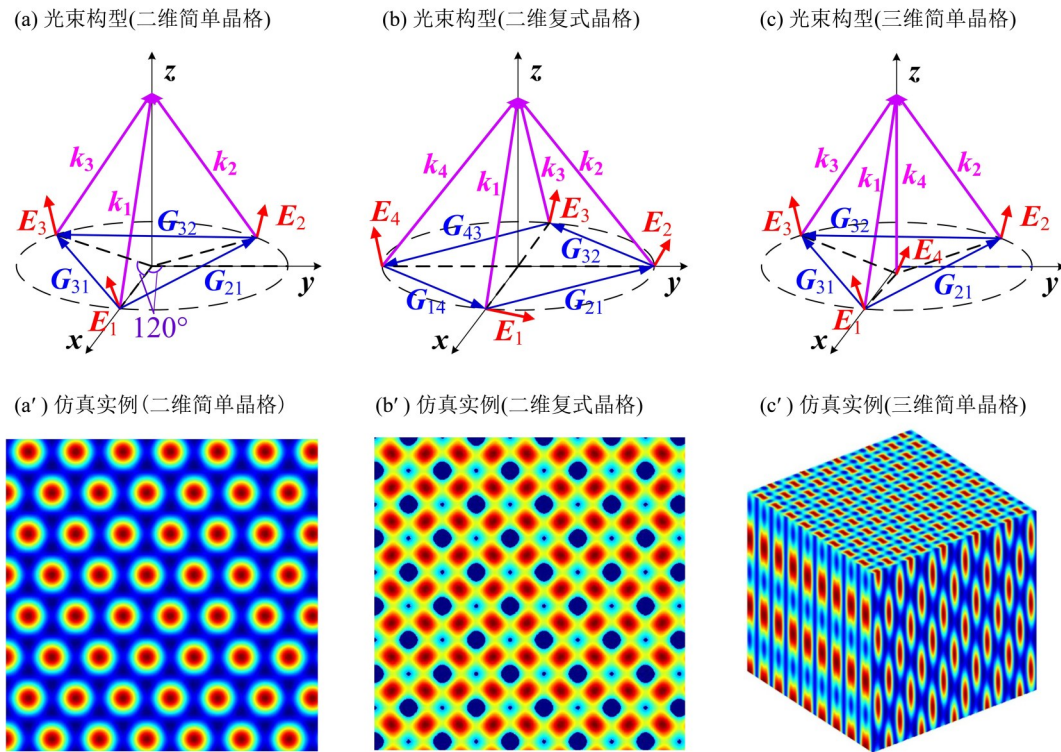


图 1 三种典型晶格光束构型及仿真实例

Fig. 1 Beam configurations and simulation examples for three typical lattices

表 1 二维简单三角晶格的光束参数

Table 1 Beam parameters of two-dimensional simple triangular lattice

k_m	Direction of k		Polarization parameters of E_a and E_b					
	$\theta_m / (^\circ)$	$\Phi_m / (^\circ)$	$ E_a $	$\theta_a / (^\circ)$	$\varphi_a / (^\circ)$	$ E_b $	$\theta_b / (^\circ)$	$\varphi_b / (^\circ)$
k_1	30	180	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	90	90	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	120	180
k_2	30	-60	1	90	210	0	120	135
k_3	30	60	1	90	330	0	120	-135

2.2 二维复式晶格

对于二维复式晶格，需要 4 束相干光产生干涉，其光束构型如图 1(b) 所示，具体光束构型参数见表 2。其中 k_1, k_2, k_3, k_4 围绕 z 轴对称分布，极角均为 30° ，方位角分别为 $180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, 90^\circ$ ，它们的波矢差 $k_{21}, k_{32}, k_{43}, k_{14}, k_{31}, k_{42}$ 为共面关系，在 xoy 平面上呈正方形分布， $k_1 \sim k_4$ 均为沿 E_a 方向的线偏振光。数值仿真结果如图 1(b') 所示，可以看出，该光束构型支持多套共面的二维正方晶格，各套子晶格的晶格常数及取向有所不同，其干涉结果彼此叠加产生二维复式正方光子晶体。

2.3 三维简单晶格

对于三维简单晶格，选取 4 束非共面相干光进行干涉，其光束构型如图 1(c) 所示。三维简单晶格的具体光束构型参数见表 3，其中 k_4 位于中心且沿 z 轴方向，极角为 0° ； k_1, k_2, k_3 围绕 k_4 对称分布，极角均为 30° ，方位角分别为 $180^\circ, -60^\circ, 60^\circ$ ，它们之间的波矢差 k_{21}, k_{32}, k_{31} 彼此共面；中心光束 k_4 与外围光束 $k_1 \sim k_3$ 之间的波矢差 k_{14}, k_{24}, k_{34} 不共面，总体上 6 组波矢差为非共面分布，故其总体干涉结果为三维光子晶体图样。 $k_1 \sim k_4$ 均为沿 E_a 方向的线偏振光，数值仿真结果如图 1(c') 所示。

表2 二维复式正方光子晶体的光束参数

Table 2 Beam parameters of two-dimensional complex square lattice

k_m	Direction of k		Polarization parameters of E_a and E_b					
	$\theta_m / (^\circ)$	$\varphi_m / (^\circ)$	$ E_a $	$\theta_a / (^\circ)$	$\varphi_a / (^\circ)$	$ E_b $	$\theta_b / (^\circ)$	$\varphi_b / (^\circ)$
k_1	30	180	1	90	90	0	120	180
k_2	30	-90	1	90	180	0	120	-60
k_3	30	0	1	90	270	0	120	60
k_4	30	90	1	90	0	0	120	90

表3 三维简单晶格的光束参数

Table 3 Beam parameters of three-dimensional simple lattice

k_m	Direction of k		Polarization parameters of E_a and E_b					
	$\theta_m / (^\circ)$	$\varphi_m / (^\circ)$	$ E_a $	$\theta_a / (^\circ)$	$\varphi_a / (^\circ)$	$ E_b $	$\theta_b / (^\circ)$	$\varphi_b / (^\circ)$
k_1	30	180	1	90	90	0	120	180
k_2	30	-60	1	90	210	0	60	135
k_3	30	60	1	90	330	0	60	-135
k_4	0	0	1	90	0	0	120	90

3 多场景虚拟仿真实验平台开发

虚拟仿真实验是指以计算机、网络等为载体, 由实验所需的模拟程序、实验单元和参考资料等组成的模拟实验的交互环境。本文以上述三种典型晶格光子晶体为对象, 综合运用Unity、C#、3dsMax、Solidworks、Substance Painter等工具开发多场景全息干涉微结构虚拟仿真实验平台。图2为开发完成后的虚拟实验环境界面。



图2 多场景虚拟仿真实验平台界面

Fig. 2 Interface of multi-scene virtual simulation experimental platform

Unity是一款能够支持实时3D互动内容创作的高效开发工具。首先, 在Unity虚拟环境中, 运用AutoCAD软件来辅助设计各种实验仪器和元件的模型, 并模拟实验运行环境。然后, 利用Solid-

works设计全反射镜、半透半反镜、万向镜、偏振片、显微物镜等光学元件的基础模型, 进一步利用3dsMax软件对上述模型进行UV展开和优化, 利用Substance Painter对模型进行贴图, 利用专业美工软件生成高精度的实验元件模型, 包括1:1分束镜、全反镜、万向镜、100×显微物镜、CCD等等, 由它们组成光学元件库。在激光器方面, 设定其工作波长为532 nm, 采用递归算法模拟激光的生成, 使其能够发射具有特定频率、特定偏振的虚拟激光。

而激光在传播过程中, 能够自动识别所遇到的光学元件, 并根据光学元件的性质(如全反射、半透半反等), 生成具有相同递归性质的新激光束, 使得经过每一个元件后生成的新激光能够继承原激光束的特性, 同时可根据实验者所加入的光学元件性质自动演算后续的传播光路, 具有自动、准确、快速等优点。最后, 按照设计的实验光路调节各光学元件的参数, 使得各束虚拟激光汇聚于特定空间位置, 利用公式(1)计算各光束干涉的空间分布, 在虚拟显示屏上显示干涉图样及主要实验参数。

该虚拟仿真实验平台支持多场景实验操作。按上述步骤完成虚拟实验平台开发后, 将其发布成exe可执行程序在本地电脑供单机使用, 同时发

布成 WebGL 程序部署到校园网内的服务器上,即可在校园网内开展在线虚拟实验研究。如图 2 所示,该虚拟仿真实验平台包括 4 个模块,分别为使用说明、实验讲义、添加仪器、实验结果。各模块功能如下:

1) 使用说明:介绍本虚拟仿真实验的背景、特色,简要说明了实验视角、方向控制、视场缩放、平移旋转、仪器交互等按键的使用要领。

2) 实验讲义:提供了简化版和详细版实验讲义,其中简化版用于快速熟悉和开展虚拟实验,详细版用于完成实验报告和进一步开展自主性实验探索。

3) 添加仪器:本模块提供了一系列虚拟光学仪器及元件,供虚拟实验过程中根据需要灵活选用,搭建实验光路。

4) 实验结果:本模块用于显示汇聚于显微物镜前干涉产生的虚拟实验结果,并给出有关几何参数和干涉图样的晶格常数。

4 多场景虚拟实验平台仿真结果

本虚拟实验平台支持多场景全息实验制作。点击虚拟激光器的绿色开关按钮,弹出二维简单晶格、二维复式晶格、三维简单晶格以及自设光路四个场景选项,如图 3 所示。其中,前三种为预设场景,而自设光路则支持实验者自行设计和搭建实验光路开展其他类型光子晶体微结构制作研究。需要说明的是,虚拟仿真中的光束参数与表 1~3 的有所不同。本文选择前三种预设光路进行虚拟仿真结果演示。



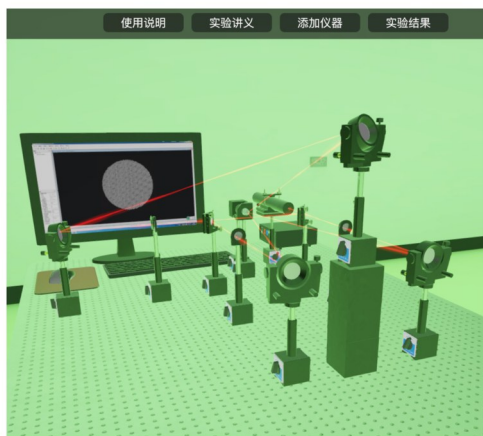
图 3 虚拟仿真平台场景选项界面

Fig. 3 Interface of the available items for virtual simulation experimental platform

4.1 二维简单晶格

图 4(a)为预设二维简单晶格的虚拟仿真实验光路图。可以看出,激光器出射的虚拟激光经过分束镜分为若干等强度子光束,选取其中 3 束入射到三个万向镜上,通过调节万向镜参数将其汇聚于显微物镜入口处,其干涉图样经显微物镜放大 100 倍后被 CCD 检测并传输到显示屏上。图 4(b)为虚拟实验产生的三角晶格光子晶体微结构。

(a) 虚拟实验场景



(b) 虚拟实验结果

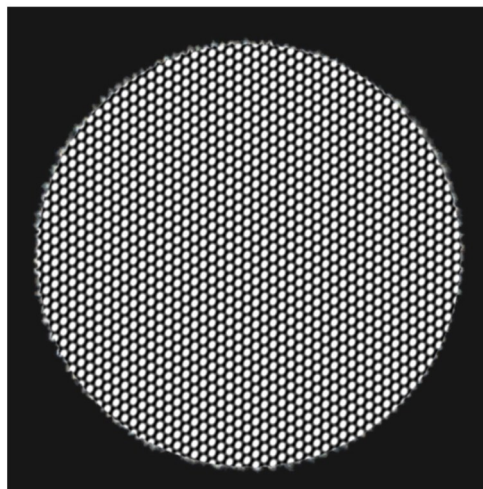


图 4 二维简单晶格光子晶体虚拟实验场景及仿真结果

Fig. 4 Virtual experimental scene and simulation result of two-dimensional simple PC

4.2 二维复式晶格

图 5(a)为预设二维复式晶格的虚拟仿真实验光路图,注意此时 4 个子光束均需用到。类似上述分析,利用若干个反射镜将 4 束等强度的子光束分别入射到位于正方形顶点(即上、下、左、右)的四个万向镜上,调整角度使其汇聚于显微物镜入口处产生干涉图案,放大后的结果如图 5(b)所示。可

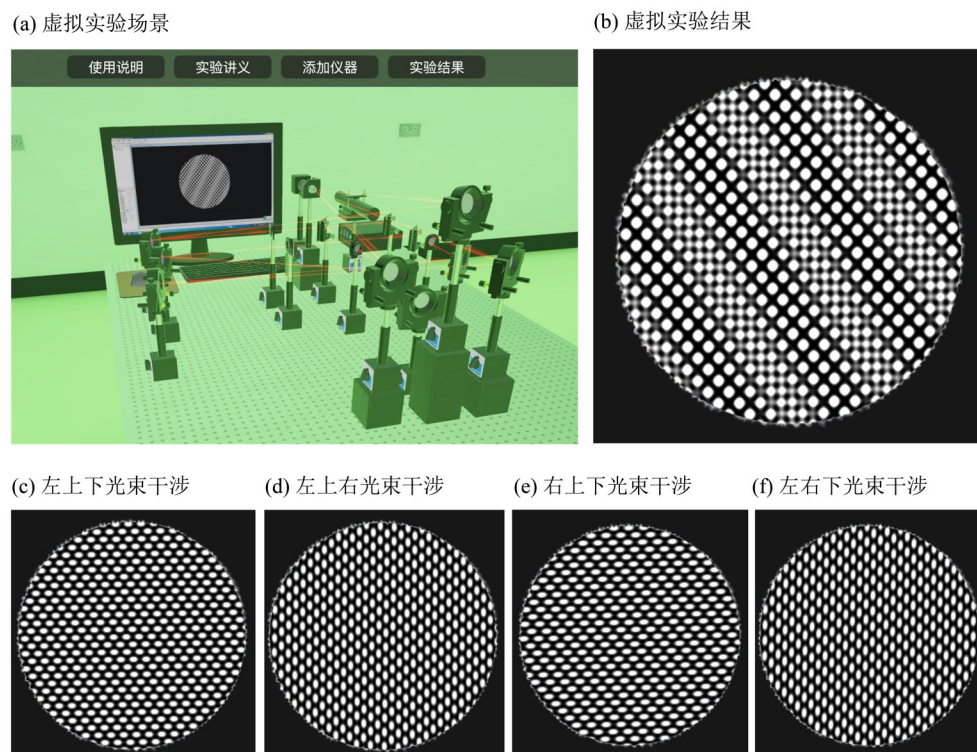


图5 二维复式晶格光子晶体虚拟实验场景及仿真结果

Fig. 5 Virtual experimental scene and simulation result of two-dimensional complex PC

可以看出, 这是一个较为复杂的二维复式晶格微结构。为便于分析, 图5(c)、图5(d)、图5(e)和图5(f)分别给出了任意4个光束干涉的子晶格图案。可以看出, 由于波矢差的对称性, 4套子晶格结构均相同, 其元胞均为椭圆形, 不同之处在于各晶格的晶格常数和元胞取向有所不同, 这4套子晶格共同叠加产生了图5(b)所示的二维复式晶格光子晶体。

4.3 三维简单晶格

图6(a)为预设三维复式晶格的虚拟仿真实验光路图。不同于二维复式晶格情况, 这里参与干涉的4束光呈立体配置, 包括中央的 k_x 光束和周围的 $k_1 \sim k_3$ 光束。利用分束器将来自于同一激光器的4束等强度子激光入射到位于4个万向镜上, 利用万向镜的粗调和微调功能使4束光汇聚于100倍显微物镜入口处产生三维干涉图案。图案经100倍率的显微物镜放大后由位于后方的CCD进行观察, 得到的结果如图6(b)所示。需要注意的是, 面阵CCD仅能够观察特定截面的二维图案, 通过改变CCD的位置, 可以观察到不同空间位置的截面图案。图6(c)、图6(d)和图6(e)分别给出了位

于 $z = 50.98, 51.00, 51.02$ cm处截面的干涉图案, 显然, 随着 z 的增大, 干涉图案发生了明显变化, 这表明不同位置的CCD阵面上检测到的干涉图样是不一样的, 因此总体干涉结果为三维立体结构。

5 结语

本文结合物理实验的现状, 提出将光子晶体全息干涉制作理论引入物理实验, 利用Unity、3dsMax等计算机工具开发了二维简单、二维复式、三维简单光子晶体等多场景的虚拟仿真实验平台, 发展了一套虚实结合的实验物理系统。

该虚拟实验平台不仅能够制作不同维度的简单晶格微结构, 而且可以产生各种类型的复式晶格微结构, 还能够通过调控各光束偏振组合形成各种丰富的元胞形状。因其具有很好的开放性和可拓展性, 是开展创新性实验研究的理想平台。特别是针对需要大量资金投入、光路复杂的三维微结构制作实验, 实体实验通常面临成本过高、推广不易等问题, 而该虚拟仿真平台可有效克服这些问题。

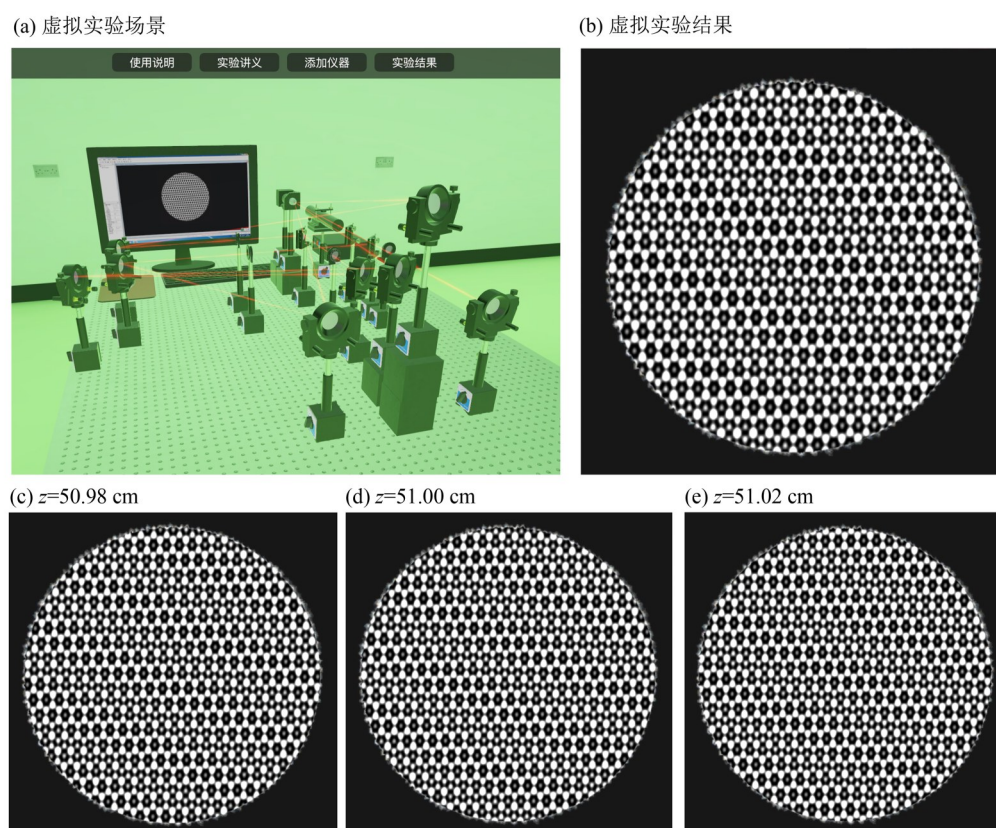


图6 三维简单晶格光子晶体虚拟实验场景及仿真结果

Fig. 6 Virtual experimental scene and simulation result of three-dimensional simple PC

参考文献:

- 董建文, 陈定尘, 庞晓宁, 等, 2014. 空域计算全息三维成像技术[J]. 中国激光, 41(7): 7-16.
- 邓莉, 孙可, 刘金梅, 等, 2022. Unity内嵌Matlab子程序实现迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验中的干涉动态演示[J]. 大学物理实验, 35(3): 124-130.
- 胡德骄, 王震, 罗铁威, 等, 2023. 面向大数据应用的大容量全息光存储技术研究进展[J]. 中国激光, 50(18): 40-53.
- 黄昆原, 韩汝琦, 1988. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社: 6-28.
- 梁文耀, 杨佳琪, 李志远, 2021. 多光束全息干涉法制作复式光子晶体的数值仿真研究[J]. 光学学报, 41(11): 1116002.
- 梁艳明, 吴琦, 周建英, 2010. 三维光场的计算全息设计与再现研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 49(5): 56-60.
- 刘娟, 皮大普, 王涌天, 2023. 实时全息三维显示技术研究进展[J]. 光学学报, 43(15): 128-141.
- 马佳洪, 叶晓靖, 陈武喝, 2023. 源于中国散裂中子源的示范性虚拟仿真实验教学项目建设[J]. 物理实验, 43(8): 43-47.
- 戚志明, 梁文耀, 陈武喝, 2014. 实时全息微结构制作的计算机仿真与设计[J]. 中山大学学报(自然科学版), 53(4): 69-73.
- 杨智慧, 刘海林, 王晓峰, 等, 2021. 康普顿散射虚拟仿真实验设计及教学实践[J]. 实验室研究与探索, 40(3): 102-106+128.
- 张勇, 贾洪声, 刘惠莲, 等, 2022. 超高压物理实验技术虚拟仿真实验设计与实现[J]. 大学物理实验, 35(5): 113-117.
- AEBY S, AUBRY G J, MULLER N, et al, 2021. Scattering from controlled defects in woodpile photonic crystals[J]. Adv Opt Mater, 9(6): 2001699.
- BOXER M, MAZLOUMI M, SNELL P, et al, 2022. Large-area photonic crystals, quasicrystals, and moire quasicrystals fabricated on azobenzene molecular glass films by pyramidal interference lithography [J]. Opt Mater Express, 12(11): 4362-4374.

- BISWAS U, NAYAK C, RAKSHIT J K, et al, 2023. Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: History and the present status[J]. *Opt Eng*, 62(1): 010901.
- CAI Z Y, LI Z W, RAVAINÉ S, et al, 2021. From colloidal particles to photonic crystals: Advances in self-assembly and their emerging applications [J]. *Chem Soc Rev*, 50(10): 5898–5951.
- HUANG M, ZHAO F L, CHENG Y, et al, 2012. Effects of the amorphous layer on laser-induced subwavelength structures on carbon allotropes [J]. *Opt Lett*, 37(4): 677–679.
- HURLEY N, KAMAU S, CUI J B, et al, 2023. Holographic fabrication of 3D moire photonic crystals using circularly polarized laser beams and a spatial light modulator [J]. *Micromachines*, 14(6):1217.
- JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, et al, 2008. *Photonic crystals: Molding the flow of light* [M]. Princeton: Princeton University Press.
- LI X B, LI Z Y, LIANG W Y, 2023a. Tunable topological slow-light in gyromagnetic photonic crystal waveguides with unified magnetic field [J]. *Opt Express*, 31(18): 29300–29311.
- LI J Q, YAN J F, JIANG L, et al, 2023b. Nanoscale multi-beam lithography of photonic crystals with ultrafast laser[J]. *Light Sci Appl*, 12(1): 164.
- LIU Y Z, PANG X N, JIANG S J, et al, 2013. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling [J]. *Opt Express*, 21(10): 12068–12076.
- LÜ H, CHU C X, YOU K, et al, 2017. Fabrication of two-dimensional special photonic crystals by symmetry-lost beam interference lithography [J]. *Optik*, 140: 25–31.
- MAO W D, ZHONG Y C, DONG J W, et al, 2005. Crystallography of two-dimensional photonic lattices formed by holography of three noncoplanar beams [J]. *J Opt Soc Am B*, 22(5): 1085–1091.
- SUN X H, WU Y L, LIU W, et al, 2015. Fabrication of ten-fold photonic quasicrystalline structures [J]. *AIP Adv*, 5(5): 057108.
- TIAN Y L, LI Q B, YAN L L, et al, 2023. A brief review on nonlinear photonic crystals induced by direct femtosecond laser writing[J]. *Photonics*, 10(7): 833.
- WU F, LIU T T, CHEN M Y, et al, 2022. Photonic bandgap engineering in hybrid one-dimensional photonic crystals containing all-dielectric elliptical metamaterials [J]. *Opt Express*, 30(19): 33911–33925.
- XIA C, GUTIERREZ J J, KUEBLER S M, et al, 2022. cylindrical-lens-embedded photonic crystal based on self-collimation[J]. *Opt Express*, 30(6): 9165–9180.
- XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, et al, 2021. Augmented reality and virtual reality displays: Emerging technologies and future perspectives [J]. *Light Sci Appl*, 10(1): 216.
- YABLONOVITCH E, GMITTER T J, LEUNG K M, 1991. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing non-spherical atoms [J]. *Phys Rev Lett*, 67(17): 2295–2298.
- YAO Y W, ZHANG Y P, FU Q Y, et al, 2024. Adaptive layer-based computer-generated holograms [J]. *Opt Lett*, 49(6):1481–1484.
- ZHOU Y, WANG Z W, WAN B F, et al, 2022. The absolute photonic band gaps and all-angle negative refraction phenomenon of two-dimensional photonic crystals composed of multi-ring scatterers [J]. *Phys B Condens Matter*, 632: 413698.

(责任编辑 王海蓉)