

文章编号:1005-4642(2025)02-0051-06

基于电磁近场扫描系统测量光子晶体的能带

袁媛,莫浩昌,董建文,赵福利,陈晓东

(中山大学 物理学院,广东 广州 510275)

摘要:在固体物理的教学中,晶体结构和能带理论是重要的基础知识。然而,现有的本科教学中缺乏相应的实验以直观演示这些概念和理论。针对这一现状,基于电磁近场扫描系统开展光子晶体能带测量实验。通过对电磁场进行近场扫描成像,表征光锥的线性色散能带,并测量光子晶体的能带及其禁带。通过构建线缺陷,设计并演示了可引导光传输的光子晶体波导,实验测量结果与仿真模拟结果一致。实验以光子晶体为研究对象,直观地展示了晶体的能带及其光场调控特性,有助于增强学生对固体物理中晶体结构和能带理论的掌握和理解。

关键词:能带;光子晶体;电磁近场扫描;傅里叶变换

中图分类号:O481.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.02.008

光子晶体是具有周期性介电常量分布的人工结构,在特定频率范围内形成光子禁带,抑制光子在特定频率范围内的传播^[1-2]。得益于具有光子禁带和支持光子局域态等特性,研究人员可以利用光子晶体实现新型光传输行为,如慢光传输^[3]和抗散射传输^[4]等。光子晶体的出现不仅丰富了人们对能带理论的理解,还开辟了诸如光子晶体光纤、微腔谐振器和光子集成电路等应用领域。固体材料的电子能带与光子晶体的光子能带均显著体现了周期性结构中波的传播现象^[5],前者聚焦于电子在晶格周期势场中的传输行为,而后者揭示了光波或电磁波在具有周期介电常量/磁导率分布结构中的传播特性。尽管两者研究的粒子与物理现象不同,但从更宏观、更抽象的“周期结构中波的传播”的视角出发,能带理论提供了统一描述波传播行为的框架。因此,通过类比与借鉴,可以利用对光子晶体能带的深入理解,来辅助阐释固体晶体能带的概念及其波传播机制。

除了对基础理论进行深入探究外,实验测量技术在能带研究领域中也具有不可或缺的重要性。在众多实验技术中,角分辨光电子能谱^[6-7]与微波布拉格衍射^[8-9]是具有代表性的晶体能带实验测量技术。角分辨光电子能谱技术的核心原理

在于利用高能紫外或 X 射线光子作为激发源,撞击材料表面,使电子获得足够能量而逃逸。通过对逃逸电子的能量和动量进行分析,可以间接揭示材料的能带结构。该技术的优势在于直接测量电子的能带,并通过角度分辨技术进一步获取三维空间中的能带信息,以帮助人们深入理解材料的电子性质。然而,由于探测深度的限制,角分辨光电子能谱主要聚焦于材料表面的电子结构信息。微波布拉格衍射技术则主要利用微波频段电磁波在周期性结构中的布拉格衍射现象来观测材料的能带结构,该技术的原理与 X 射线在晶体中的布拉格衍射^[3]类似,允许研究人员在不破坏样品的前提下,对更大尺度的周期性结构进行研究,具有可重复测量的优点,为科学实验的验证与改进提供了便利。但是,利用微波布拉格衍射技术测量晶体能带时,实验容易受电磁环境干扰,因而不适合作为本科教学实验。

固体物理^[10-11]是物理学本科教学的重要组成部分。尽管课程中涉及大量能带理论的知识,但本科实验教学课程中关于晶体能带测量实验仍较为匮乏。本实验以光子晶体为研究对象,展示了光子晶体的能带及其禁带,通过电磁近场扫描成像系统对晶体的能带进行了测量和表征。同时,

收稿日期:2024-06-16;**修改日期:**2024-07-09

基金项目:粤疆藏区域联合光学虚拟教研共同体建设项目(No. GDSGGT2022003);2022 年度广东省高校教学质量与教学改革工程项目-光学虚拟教研室(粤教高函[2023]4 号)

作者简介:袁媛(2003-),女,湖南郴州人,中山大学物理学院 2021 级本科生。E-mail:yuany276@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:陈晓东(1988-),男,广东惠来人,中山大学物理学院副教授,博士,从事超构材料中的光场调控研究和光学教学工作。E-mail:chenxd67@mail.sysu.edu.cn

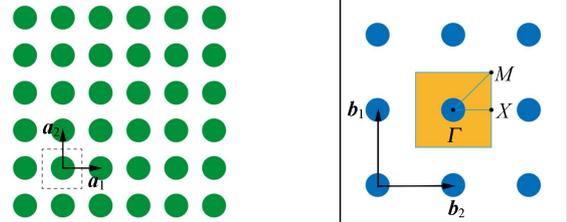
通过引入线缺陷设计了支持光子边界态的光子晶体波导. 相比角分辨光子能谱和微波布拉格衍射方法, 本实验所采用的电磁近场扫描系统具有成本低、操作简单、高空间分辨率和非破坏性等优点, 可以获取高空间分辨率的电磁场分布信息. 另外, 直接测量光子晶体的近场分布, 可以反映局域电磁波行为, 并且对样品没有破坏性, 可实现重复测量, 适合开展本科生实验教学. 本实验为学生提供了直观理解晶体能带结构的平台, 将抽象的能带理论形象化, 有助于学生更好地理解晶体能带、禁带和边界态等关键概念.

1 晶体与能带

实验研究二维晶格, 示意图如图 1(a) 所示. 在固体物理学中, 通常称坐标空间为正空间, 称波矢空间为倒空间. 在波矢空间(倒空间)中, 由 2 个晶格基矢 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 定义 2 个新的矢量 $\mathbf{b}_1 = \frac{2\pi\mathbf{a}_2}{a^2}$ 和 $\mathbf{b}_2 = \frac{2\pi\mathbf{a}_1}{a^2}$, 称为倒格子基矢, 其中 a 为晶格常量. 每个格点的位置为 $\mathbf{G}_n = n_1\mathbf{b}_1 + n_2\mathbf{b}_2$, 其中 n_1 和 n_2 为整数, 称 \mathbf{G}_n 为倒格子矢量, 简称倒格矢(与波矢 \mathbf{k} 的量纲相同). 如果在 \mathbf{k} 空间中把原点和所有倒格子的格点之间的连线 \mathbf{G}_n 的垂直平分面都画出来, \mathbf{k} 空间被分割成许多区域, 在每个区域内能量 E 对动量 \mathbf{p} 准连续变化, 这些区域称为布里渊区, 中心的布里渊区称为第一布里渊区, 如图 1(b) 中黄色正方形框. 第一布里渊区中存在具有高对称性的波矢, 即 Γ , X 和 M 点. 其中, Γ 点是布里渊区的中心点, 对应于零波矢, 相当于实空间中的原点, 而 X 和 M 点位于第一布里渊区边界. 对于二维正方晶格, 3 个高对称波矢点的坐标通常记为 $\Gamma(0, 0)$, $X(\pi/a, 0)$ 和 $M(\pi/a, \pi/a)$. 随着波矢在布里渊区内沿着高对称波矢点演化, 光子晶体本征模式的能量(即频率)构成准连续的能带. 频率不同的各能带之间的间隔称为禁带, 在该能量区间内不存在麦克斯韦方程的本征解.

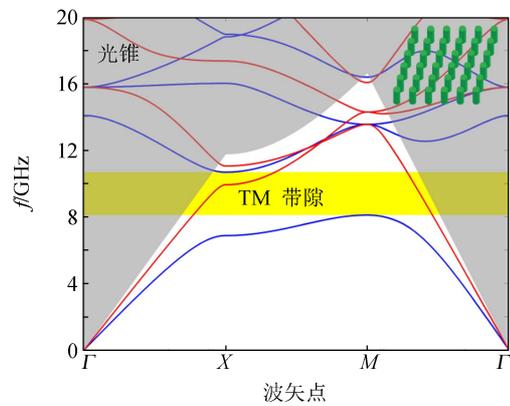
图 1(c) 展示了二维正方晶格光子晶体的能带图. 如图 1(c) 右上角插图所示, 该晶体由介质圆柱在 $x-y$ 平面上按照二维正方晶格排列形成. 在光子晶体的能带中, 蓝线表征横磁场(Transverse magnetic, TM) 模式, 红线表征横电场

(Transverse electric, TE) 模式, 阴影部分表示光锥. 其中, 中间黄色高亮的区域为 TM 模式的带隙, 意味着在黄色高亮的频率范围内, TM 偏振的体模式不能在光子晶体内部传播.



(a) 光子晶体示意图

(b) 光子晶体的倒空间



(c) 光子晶体的能带

图 1 二维正方格子的光子晶体及其能带

2 电磁近场扫描系统

使用电磁近场扫描系统测量光子晶体的能带. 电磁近场扫描是用于测量和成像电磁场分布的技术, 其核心原理是利用探针(如微小天线、偶极子天线或微波探针)在样品表面或附近扫描时与局部电磁场相互作用, 使得探针上感应出电压或电流信号, 这些信号与探针位置和局部电磁场强度相关. 矢量网络分析仪(Vector network analyzer, VNA)可以测量信号的幅度和相位, 采集探针上的信号并传输到 VNA, 数据经过处理得到样品表面电磁场的空间分布. 通过傅里叶变换, 可以将空间域的信息转换为波矢域的信息, 进一步分析频率与波矢的关系, 进而推导出能带结构.

图 2 为电磁近场扫描系统, 包括 VNA、控制电箱、控制软件、二维平移台、垂直升降台、线缆与探针以及实验样品. VNA 是用于测量射频和微

波频率范围内网络参数的仪器,主要用于表征射频和微波组件以及系统的传输特性和反射特性.在实验中,VNA 不仅作为微波信号源输出微波波段的电磁波,还作为信号收集器进行散射参量(即 S 参量)的数据采集.安装在实验室电脑上的控制软件用于调节扫描系统的扫场范围和扫场精度、扫频范围和扫频精度,实现全自动扫场.二维平移台为实验中的 $x-y$ 平面内扫场提供自动移动功能,而垂直升降台用于调整 z 方向的探针位置.激发探针和扫场探针通过同轴电缆连接至 VNA 的 2 个端口,用于激发和探测光子晶体样品的电场分布.

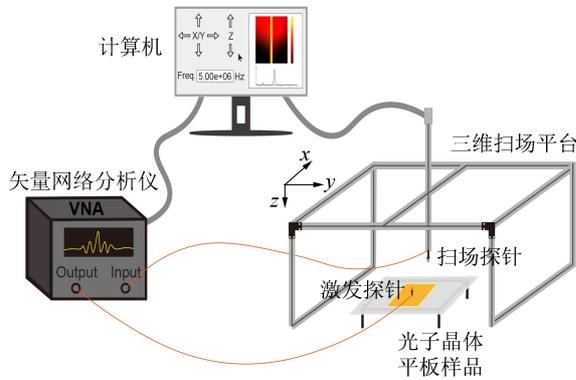


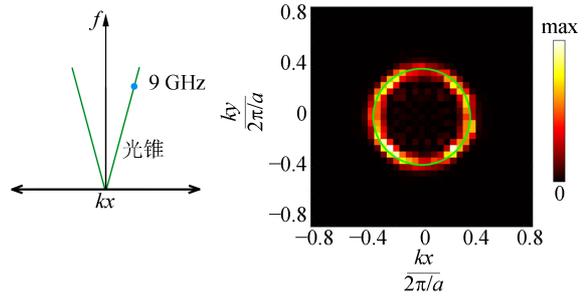
图 2 电磁近场扫描系统

在实验过程中,实验者通过控制软件输入扫场参量,如扫场的起始位置和扫场精度.随后,VNA 将扫场信号传递给控制电箱,控制电箱根据预设参量控制二维平移台和垂直升降台进行移动,测量每个坐标点下不同频率的电场信号.通过汇总所有坐标点下的测量数据,得到不同频率下的平面内电场分布,再通过后续数据处理获得光子晶体的能带结构.

3 光子晶体能带测量实验

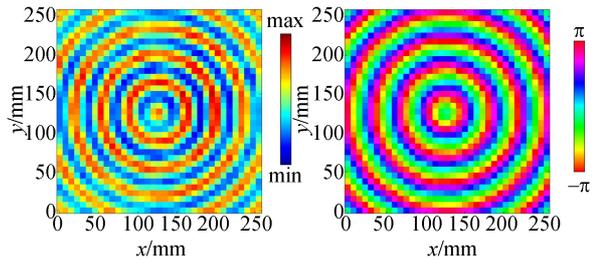
3.1 观测激发探针在空气中激发的电场

利用支撑件稳固地支撑底板,然后将激发探针放置在底板中并用线缆连接,不放入陶瓷圆柱体,用机械臂夹具夹持扫场探针,使探针尖端距离底板上表面约 25 mm,调整好探针位置后即可打开机械臂开关开始扫场.设置 x 和 y 的扫场范围均为 255 mm,扫场步长 dx 和 dy 均为 7.5 mm,该设置对应的扫场时间约为 30 min.扫场结束后处理扫场数据,如图 3 所示.



(a) 空气光锥示意图

(b) 等频线



(c) 电场幅值的实空间分布 (d) 电场幅值的相位分布

图 3 9 GHz 频率下电场分布及光锥测量

图 3(a)为光锥的示意图,蓝色点表示 9 GHz 频率的位置.在动量空间中,光锥描述了光波的频率与波矢量的关系:光锥以内的态被称为连续态,连续态光波可以在自由空间中传播并辐射到介质外部;光锥外的态被称为束缚态,其能量局限于介质内部,束缚态光波的传播受到介质边界条件的限制,泄漏出板外的能量会迅速衰减,形成倏逝波.根据电动力学的基本知识,在介质中光的频率满足 $\omega = v|k|$, v 为介质中的光速.如果将面内波矢记为 k_{\parallel} ,面外波矢记为 k_z ,则平面波满足 $\omega = v\sqrt{k_{\parallel}^2 + k_z^2}$.而光锥外的束缚态 $\omega < v|k_{\parallel}|$, k_z 为虚数,对应倏逝波.这样分界线 $\omega = v|k_{\parallel}|$ 在动量空间中形成圆锥体区域,即光锥,只有在光锥以内的模式才能与平面波耦合.

图 3(b)为激发频率为 9 GHz 时电场分布经傅里叶变换后得到的等频线,即 k 空间中的场分布,绿色圆形表示 9 GHz 时光锥的形状.可以观察到,实验测量的 9 GHz 下光锥色散曲线(颜色块)与理论预言的光锥色散曲线高度吻合,这初步验证了利用电磁近场扫描系统测量得到色散能带的可靠性.

图 3(c)为激发频率为 9 GHz 时电场 E_z 在实空间中的分布,红色表示正最大值,蓝色表示负最大值.整体图像显示,激发源在空气中激发的 E_z

呈同心圆环结构. 从图 3(c)中电场 E_z 的同心圆环分布可以猜测, 光波的相位在空间中呈周期性变化. 如图 3(d)所示, 对应相位的空间分布如预言所示, 以原点为对称中心呈同心圆环分布.

3.2 构建光子晶体样品, 测量能带

实验所用的光子晶体样品由高度为 25 mm 的陶瓷圆柱在尺寸为 268 mm × 268 mm 的带孔金属底板上按正方晶格排列构成, 如图 4 所示. 在微波频段, 实验中所使用的金属底板可以看作完美电导体, 其边界条件可以过滤掉 TE 模式, 只保留 TM 模式^[12]. 实验中, 在 x 方向和 y 方向各略去 1 列圆孔(不插入陶瓷圆柱体), 即共插入 20 行 × 20 列的陶瓷圆柱体, 构建尺寸为 255 mm × 255 mm 的光子晶体, 晶格常量 $a = 12.75$ mm. 在光子晶体的能带测量实验中, 同样设置 x 方向和 y 方向的扫场范围为 255 mm, 扫场步长 dx 和 dy 为 7.5 mm. 用机械臂夹具夹持测量探针, 使其距陶瓷圆柱顶端约 3 mm, 让探针在光子晶体样品上方逐点移动, 同时记录每个坐标点不同频率下的电场响应, 以便后续实验数据处理.

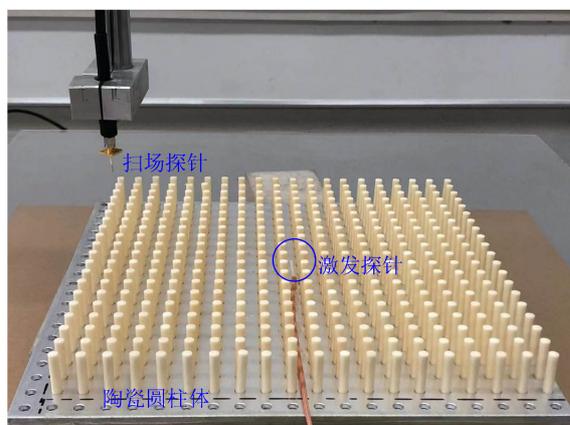


图 4 光子晶体样品照片

处理扫场数据后得到光子晶体中激发的电场分布, 如图 5 所示. 4 GHz 和 5 GHz 频率下 E_z 的场分布均近似为同心圆环, 但在同一圆环上强弱分布不均匀, 电场强度从中心向外逐渐减弱, 符合电场强度与距离的平方成反比的规律. 与图 3(c)比较, 空气中的场分布表现为比较规整的圆环, 而光子晶体中的电场受到光子晶体的周期性折射率的调制, 同一圆环上的电场强度分布不均匀. 电磁波在介电常量较大的区域内传播速度较慢, 因此高介电常量区域对电磁波能量的约束较强, 这

种局域化现象导致高介电常量区域附近(陶瓷圆柱)的电场强度较强, 而在低介电常量区域(空气)的电场强度较弱, 形成强弱分布不均的电场分布. 对比不同频率下电场的空间分布, 发现频率越高, 光波波长越短, 同心圆环的间距越小, 显示出更紧密的分布图样, 相应地, 相位变化也更加迅速. 图 5(c)和图 5(d)为对应频率下 k 空间中能量分布图, 其中绿色圆圈表示数值仿真得到的光子晶体 TM 模式的等频线, 灰色区域表示光锥. 可以看出, 2 个不同频率下实验测量所得 TM 模式等频线均呈现为在光锥附近的圆环, 与数值仿真结果高度吻合.

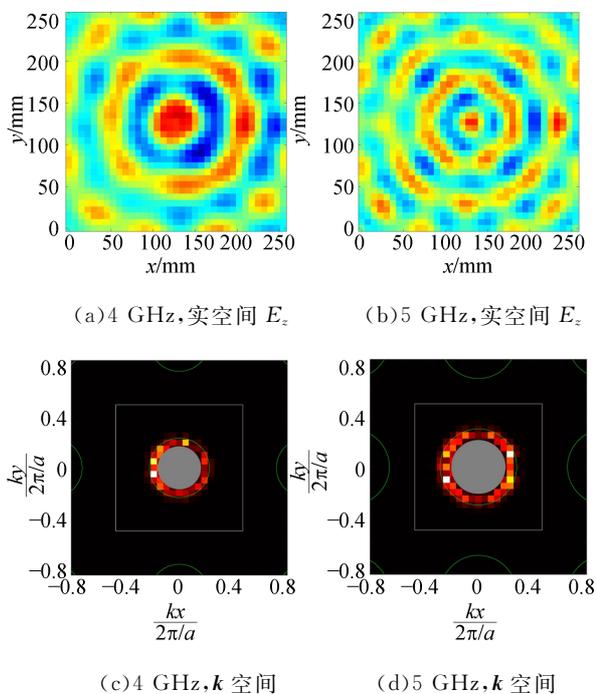


图 5 光子晶体的场分布及对应的等频线

通过测量偶极子天线在光子晶体中激发的电场在不同频率下的场分布特性, 建立起电场与空间位置之间的直接关联. 随后, 对某个频率下的场分布数据进行傅里叶变换处理, 这一步骤实现了电场信息从空间域向波矢域的转换, 等频线揭示了各波矢分量上的振幅与相位细节. 从等频线分布可以看到, 波矢空间中振幅显著增强的区域(即黄红亮点处), 明确指示了在该特定波矢上存在的本征模式. 为了分析光子晶体的频率响应特性, 针对多个不同频率下的电场分布重复执行上述傅里叶变换流程, 逐一识别出每个频率下本征模式所对应的波矢. 随后, 将不同频率下结果叠

加与整合,构建描述频率与波矢之间关系的图谱,即为光子晶体的能带图。

图6为光子晶体能带绘制过程与最终实验测量的能带图。图6(a)将12个频率下 k 空间场分布图叠加,当频率较低时,等频线集中在光锥外围;当频率继续提高时,等频线不断向外扩张,并在11 GHz和12 GHz频率下等频线主要集中在布里渊区边界。图6(b)为光子晶体的实验测量能带图,其中插图表明能带沿第一布里渊区边界进行取值,同时实验中对图示4个路径进行叠加以消除能量分布不均的影响。能带图中的色块代表实验结果,颜色越亮代表场强越强,绿点代表理论仿真的TM模式,灰色阴影表示光锥,可见实验结果与数值仿真结果吻合。

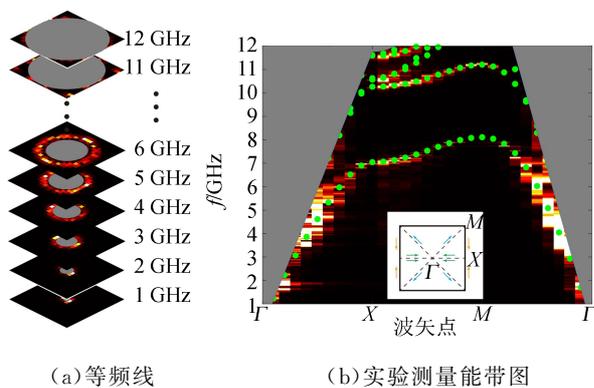


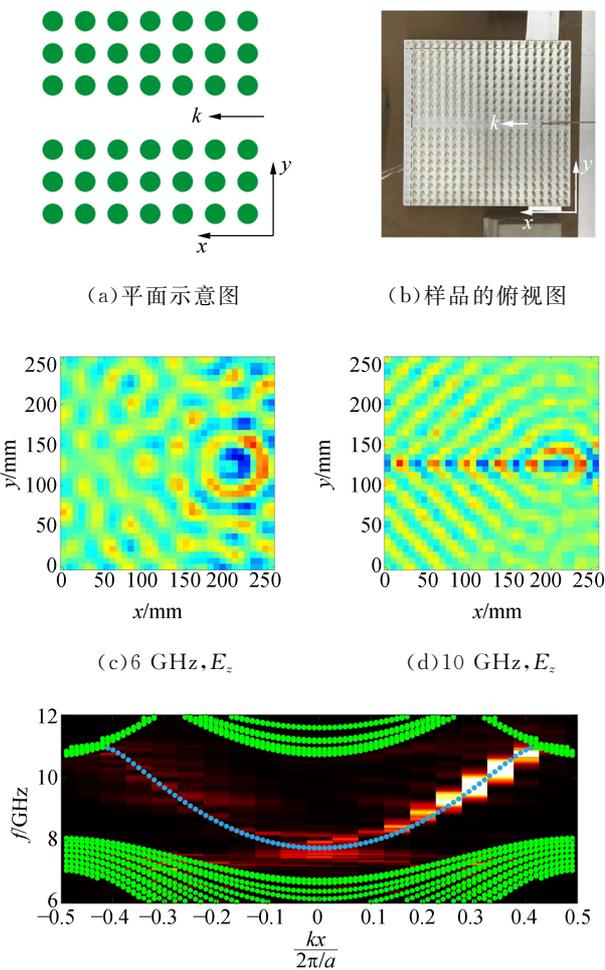
图6 光子晶体的能带测量

3.3 构造光子晶体线缺陷波导,测量边界态能带

通过将光子晶体的某一列陶瓷圆柱体移动至边界引入线缺陷,构造光子晶体波导,并测量边界态色散曲线。

图7(a)为光子晶体波导的平面示意图,图7(b)为对应的光子晶体波导实验样品俯视图。基于上述扫场设置和操作,可以得到不同频率下 E_z 的分布。图7(c)为6 GHz频率下的扫场结果,所得电场在整个样品中弥散,这是因为光子晶体支持该频率的体模式。图7(d)为10 GHz频率下电场的扫场结果,所得电场局域在构建的波导之中,这是因为10 GHz位于光子晶体的禁带中,所对应的电磁波无法传播到光子晶体中,而放置在线缺陷中的激发探针所激发的电磁波被光子晶体反射回中间的缺陷处,所以最终能量明显局域在中间的波导中。图7(e)为实验测量的光子晶体边界态能带图,色块代表实验测量结果,晶体内的体模式形成连续区域(由密集连续的绿色点填充)。在

光子晶体的禁带带隙内产生了边界态,蓝色圆点为该波导的边界态色散曲线的数值仿真结果。由图7(e)可看到,实验结果与数值仿真结果吻合。



(e)光子晶体边界态能带图

图7 光子晶体的边界态测量

4 结束语

本文利用电磁近场扫描系统,结合数值仿真和实验测量,研究了光子晶体的能带和边界态。实验中,利用电磁近场扫描成像系统获取光子晶体中的电场分布图,与空气中规整的同心圆环场分布不同,由于受到光子晶体原胞(即陶瓷圆柱体)的调制,光子晶体中的电场呈现出能量局域在光子晶体周围的“虚线环”。该现象直观展示了光子晶体内的能带结构及其对光的调制效果。通过在光子晶体中引入线缺陷,构建光子晶体波导,从而有效引导光的传输。实验结果展示了光子晶体的体态和边界态的场分布图像,且测量的能带和边界态色散曲线与数值仿真结果吻合。该实验不

仅帮助学生更好地理解光锥和能带等概念,还提供了直观的实验操作体验. 该实验在理论上深化了学生对晶体能带理论的理解,通过更直接的观察和测量手段,使抽象的理论概念具象化. 随着科学技术的不断进步,该实验方法在未来光子学器件设计和新材料开发中具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987,58(23):2486-2489.
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987,58(20):2059-2062.
- [3] BABA T. Slow light in photonic crystals [J]. *Nature Photonics*, 2008,2(8):465-473.
- [4] TANG G J, CHEN X D, SUN J, et al. Broadband and fabrication-tolerant 3-dB couplers with topological valley edge modes [J]. *Light: Science & Applications*, 2024,13(1):166.
- [5] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, et al. *Photonic crystals* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2008:248-251.
- [6] DAMASCELLI A. Probing the electronic structure of complex systems by ARPES [J]. *Physica Scripta*, 2004,T109:61-74.
- [7] BOSCHINI F, ZONNO M, DAMASCELLI A. Time-resolved ARPES studies of quantum materials [J]. *Review of Modern Physics*, 2024,96:015003.
- [8] CORNICK M T, FIELD S B. Microwave Bragg diffraction in a model crystal lattice for the undergraduate laboratory [J]. *American Journal of Physics*, 2004,72(2):154-158.
- [9] GINZBURG N S, SERGEEV A S, KOCHAROVSKAYA E R, et al. Diffraction mode selection in planar Bragg resonators of optical and microwave wavelength ranges [J]. *Physics Letters A*, 2020,384(10):126219.
- [10] 胡安. 固体物理学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2020:34-40.
- [11] 黄昆. 固体物理学[M]. 北京:北京大学出版社,1979:176-184.
- [12] CHEN X D, DENG W M, SHI F L, et al. Direct observation of corner states in second-order topological photonic crystal slabs [J]. *Physical Review Letters*, 2019,122(23):233902.

Measuring energy band of photonic crystal based on electromagnetic wave near-field scanning systems

YUAN Yuan, MO Haochang, DONG Jianwen, ZHAO Fuli, CHEN Xiaodong
(School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In solid-state physics teaching, the understanding of crystal structures and band theory is crucial. However, the corresponding experiments are lack in undergraduate teaching to visually demonstrate these concepts and theories. To address this issue, an experiment focused on the measurement of photonic crystal band dispersions was introduced using the near-field electromagnetic wave scanning system. Through the near-field scanning imaging of the electromagnetic field, the linear band dispersions of light cones could be characterized, and as well the bands and forbidden bands of photonic crystals were measured. By constructing a line defect, the photonic crystal waveguide capable of guiding light transmission was designed and demonstrated. The experimental result was consistent with the simulation. Having photonic crystals as the object, this experiment visually illustrated the characteristics of band structure of crystal and their light field modulation, thereby enhancing students' understanding of crystal structures and band theory in solid-state physics.

Key words: energy band; photonic crystals; electromagnetic wave near-field scanning; Fourier transform

[编辑:任德香]