

十二重准晶光子结构中的负折射与成像

冯志芳¹ 张向东² 王义全³ 李志远¹ 程丙英¹ 张道中¹

(1 中国科学院物理研究所 北京 100080)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

(3 北京交通大学光波研究所 北京 100044)

摘要 最近实验证明周期性的光子晶体中存在电磁波的负折射现象,并且观测到亚波长成像.然而,这些研究主要集中在周期性结构中,对非周期结构的研究还没有相关的报道.文章报道了一种新的理论和实验结果:非周期性十二重准晶光子结构同样存在负折射,并且可以实现超透镜的远场成像.具有这些特性的光子准晶可以广泛的应用于光集成器件中.

关键词 准晶,负折射,成像

Negative refraction and imaging using 12-fold-symmetry quasicrystal structures

FENG Zhi-Fang¹ ZHANG Xiang-Dong² WANG Ying-Quan³

LI Zhi-Yuan¹ CHENG Bing-Ying¹ ZHANG Dao-Zhong¹

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(2 Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(3 Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Recently, negative refraction of electromagnetic waves in photonic crystals was demonstrated experimentally and subwavelength imaging observed. However, these investigations all focused on the periodic structure. Here we report a new theoretical and experimental finding that negative refraction can occur in certain transparent quasicrystalline photonic structures. More interestingly, a superlens based on 2-dimensional photonic quasicrystals can form a non-near-field subwavelength image whose position varies with the source distance. This property makes such quasicrystals promising for application in a range of optical devices.

Keywords quasicrystal, negative refraction, image

光折射是光学中最为基本的现象.最近对负折射和左手材料的理论和实验研究受到广泛关注. Veselago 早在 1968 年就从理论上分析了这种材料的特性^[1],但直到最近才得到实验上的证明^[2,3].左手材料最主要的应用是制作平板型的透镜(超透镜),它可以克服传统光学透镜的衍射分辨率极限^[4].左手材料中还存在多种反常特性^[5].然而左手材料中包含有金属材料,金属材料固有的吸收限制了它更为广泛的应用.

更为有趣的是,在周期性的光子晶体^[6-8]中同

样发现了负折射现象.周期结构中发生负折射是由波传输的色散特征引起的,可以用它的等频率曲面来描述负折射情况.最近的实验进一步证明在光子晶体中存在亚波长成像,并且应用它可以实现远场成像^[9-11].

本文报道了一种新的理论和实验结果:在非周

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2001CB610402, 2004CB719804)和国家自然科学基金(批准号:10374009)资助项目

2005-08-22 收到

期的结构十二重准晶中同样存在负折射并且可以实现远场的亚波长成像. 我们研究的准晶由正方形和三角形在空间按照一定的规律堆砌而形成的,它具有十二次旋转对称^[12,13],称之为十二重准晶. 实验中的样品是由介电常数为 8.6,半径为 3.0mm 的介质柱插入泡沫型的背景介质中形成的,背景介质的介电常数为 1.04. 最近邻的两个介质柱之间的距离为 10mm.

测量透射谱所用的实验样品是厚为 110mm,宽为 400mm 的样品. 样品置于散射腔内^[14],腔的两端是喇叭型天线,HP8757E 的网络分析仪是电磁波的发射源和接收装置. 我们主要研究 TM 偏振的电磁波,它的电场偏振方向沿柱子的方向. 图 1 给出了实验测量结果(虚线)和用多重散射方法^[12]算(实线)的结果. 可以看出两者比较好的符合. 我们的目的是研究准晶结构中电磁波的折射特征,主要考虑带隙附近的频率.

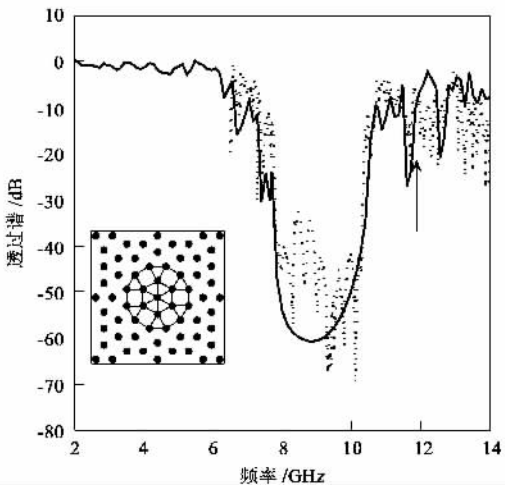


图1 十二重准晶透射系数的测量(虚线)和实验结果(实线)的比较

为了研究电磁波通过准晶与空气接触表面的折射情况,我们构造了不同倾角 θ_0 的楔型样品. 为了避免多次偏折,实验中所用样品的左表面都与入射电磁波垂直. 图 2 给出了倾角为 30° 的楔型样品的实验结果. 当某一频率的电磁波(缝光源)垂直入射到样品的左表面时,电磁波传播方向不发生改变,直到传播到样品的出射面. 电磁波经过出射面时,其中一部分电磁波进入空气传播,其他部分电磁波反射回样品传输. 经过样品表面电磁波的传输可能有两种情况:沿法线的左侧传输(负折射),或者沿法线的右侧传输(正折射). 入射角为楔型样品的倾角 θ_0 . 因而选择不同倾角的楔型样品,根据 Snell 定律

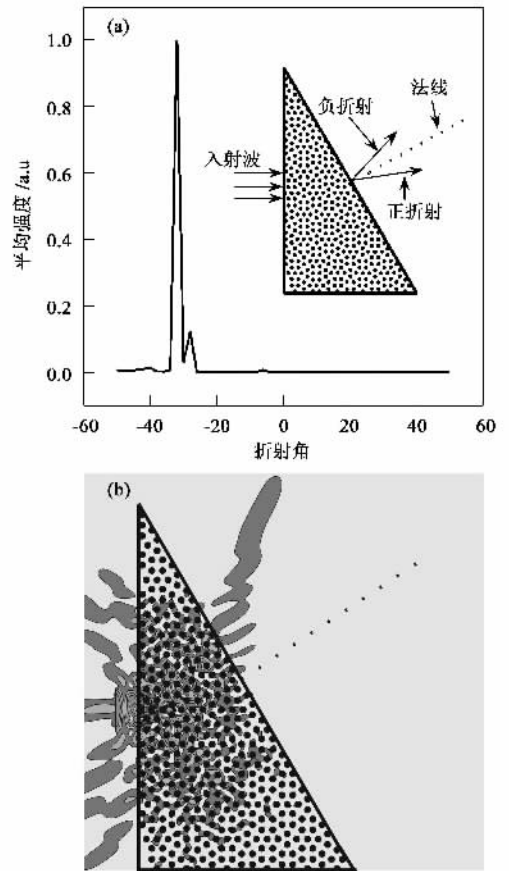


图2 (a)入射角为 30° , 频率为 11.82GHz 模型样品时折射角的测量结果 (b)对应样品的理论模拟的场分布

可以推导出折射角.

测量偏折所用的实验装置是半圆形的腔,探头可以沿圆环轨道转动. 图 2(a)给出了入射角为 30° , 对应频率为 11.82GHz 出射电磁波沿各个方向的透射强度. 在 -32° 测量到一个尖锐的峰,即入射角为 30° 时,对应的折射角为 -32° . 根据折射定律,计算得到对应频率的有效折射率为 -1.06 . 为了解实验结果,我们用多重散射的方法计算了对应结构的场分布结果,如图 2(b)所示. 可以看到折射波的能量流沿着负折射方向传输. 计算的折射角与实验测量结果一致.

图 3 给出了在频率为 11.82GHz 时理论计算(实线)和实验测量的(黑点)折射角随入射角的变化关系. 在这一频率观测到了全角负折射. 另外, θ 与 θ_0 近似于线性变化,说明准晶样品具有接近于 -1 的有效折射率和在较大入射角范围内折射率随入射方向的依赖性微弱. 也就是说,这种结构表现出较小的空间色散. 具有这一特性准晶可以用来制作超透镜. 我们用 400mm 宽,70mm 厚的样品来研究准晶

的点光源成像. 入射光源距离样品左表面的距离为 35mm. 首先模拟计算了对应结构的场分布, 结果如图 4 (a) 所示. x 和 y 分别表示波传输的平行和垂直方向. 可以观测到在样品的另一侧形成一个高质量的像, 像距离样品右表面的距离为 35mm, 像的横向大小为 0.4λ , 它小于传统的衍射极限 (0.5λ). 这一结果暗示准晶结构中衰减波的增强. 由于驻波和传输波同时存在, 很难从场分布图中区分出电磁波的衰减分量, 通过分析像与不同厚度样品的汇聚可以解决这一问题.

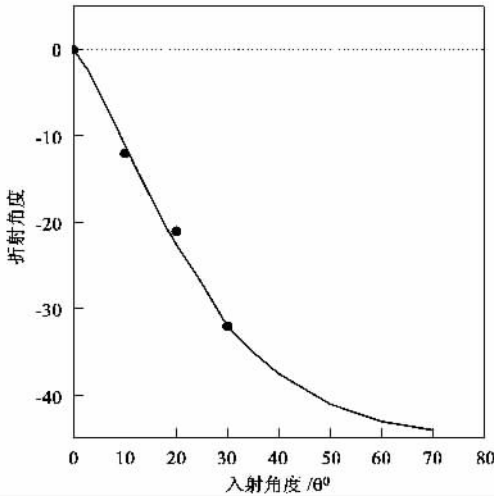


图3 频率为 11.82GHz 时, 折射角随入射角变化的实验(黑点)和计算(实线)结果

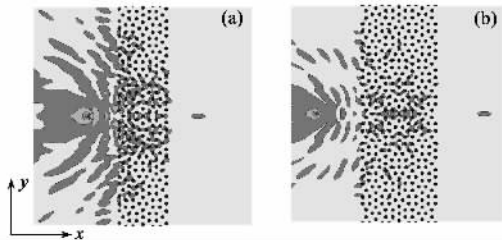


图4 (a) 频率为 11.82GHz, 样品厚度分布为 70mm (a)和 110mm (b)时, 点光源成像的理论强度分布图

为了澄清成像与聚焦的样品厚度的相关性, 我们测量了一系列不同厚度的样品. 图 4 (b) 给出的是厚为 110mm 样品的电场分布图. 入射的点光源距离样品左表面的距离为 55mm, 在对称的位置可以看到一个像点. 更为有趣的是, 在样品的中心也同样存在一个像点. 随着样品厚度的增加(相同物距), 像距离样品右表面的距离也在增加, 这有力的证明了准晶结构中衰减波的增强. 这一结果与 Veselago 和 Pendry 预言的 $n = -1$ 的左手材料的成像和聚焦的

理论分析相一致. 周期性结构和准晶相比较, 周期性光子晶体的像总是在近场区域, 像距和物距没有线性相关性.

我们用实验来证明前面的理论分析. 实验中用单极天线作为点光源, 记录像平面的强度分布. 测量结果如图 5 (a), (b) 中的黑点所示, 实线是理论计算结果. 理论结果与实验结果很好的符合. 用相同的方法研究了不同频率的特性, 发现在 11.78GHz 到 11.9 GHz 的范围都可以发生负折射, 此区域在图 1 箭头所示的位置上. 然而最好的聚焦发生在频率为 11.82GHz 时. 在这一频率时在样品表现出很小的空间色散. 这是由于十二重准晶具有较高的对称性. 准晶与周期性结构相比, 更接近于各向同性的均匀介质. 这使得准晶成为观测左手材料特性的较好的结构.

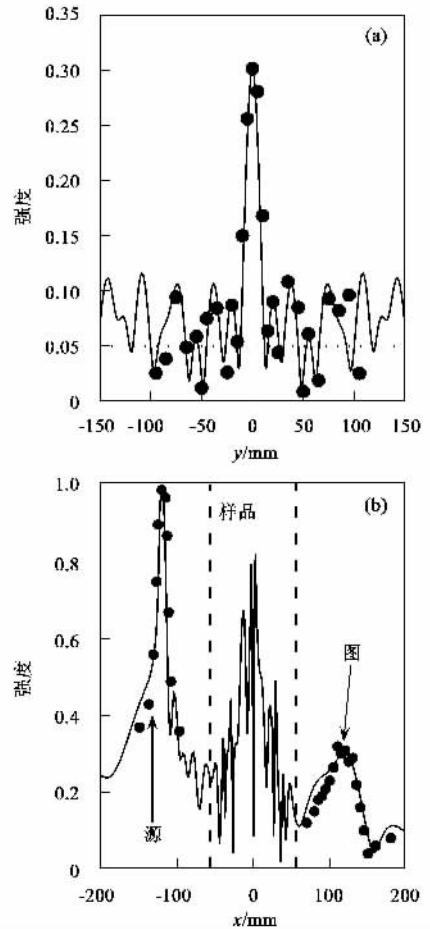


图5 沿着像平面 y 方向 (a) 和 x 方向 (b) 方向的强度分布的实验(黑点)和计算(实线)结果. 同时给出了没有样品时的空间强度分布(虚线)

准晶中负折射的产生类似于周期结构. 周期结构中产生负折射是由于布拉格散射效应. 最近的实

验^[15]已经证明周期结构中的 Bloch 函数和类 Bloch 态可以应用于准晶结构. 十二重准晶是由正方形和三角形堆砌而成, 他们形成的周期结构存在负折射. 由这些基元堆砌形成的准晶也应该存在负折射. 本文已经从理论和实验上证明了这一分析.

总之, 我们已经从理论和实验上证明了在准晶结构中同样存在负折射率并且在微波区域已经观测到负折射现象^[16]. 与存在金属元素的左手材料相比, 纯介质形成的准晶结构可以大大减小吸收带来的损耗. 具有负折射特性的光子准晶结构可以用来制作光学器件, 如可见光波段的超透镜, 可以广泛的应用于光集成电路中.

致谢 感谢中国科学院超级计算中心为我们提供的计算机时.

参 考 文 献

- [1] Veselago V G. Sov. Phys. Usp. , 1968 , 10 509
- [2] Shelby R A , Smith D R , Schultz S. Science , 2001 , 292 : 77
- [3] Smith D R , Padilla W J , View D C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2000 , 84 : 4184
- [4] Pendry J B. Phys. Rev. Lett. , 2000 , 85 : 3966
- [5] Li J , Zhou L , Chan C T , Sheng P. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 : 083901
- [6] Luo C , Johnson S G , Joannopoulos J D *et al.* Phys. Rev. B , 2002 , 65 : 201104
- [7] Luo C , Johnson S G , Joannopoulos J D *et al.* Phys. Rev. B , 2003 , 68 : 045115
- [8] Li Z Y , Lin L L. Phys. Rev. B , 2003 , 68 : 245110
- [9] Wang X , Ren Z F , Kempa K. Opt. Express , 2004 , 12 2919
- [10] Hu X , Chan C T. Appl. Phys. Lett. , 2004 , 85 : 1520
- [11] Zhang X. Phys. Rev. B , 2004 , 70 : 195110
- [12] Zhang X , Zhang Z Q , Chan C T. Phys. Rev. B , 2001 , 63 : 081105
- [13] Zoorob M E *et al.* Nature (London) , 2000 , 404 : 740
- [14] Jin C , Cheng B , Man B *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1999 , 75 : 1848
- [15] Rotenberg E , Theis W , Horn K *et al.* Nature (London) , 2000 , 406 602

BSOE 北京晨辉日升光电技术有限公司

BEIJING SUNRISE OPTOELECTRONICS CO., LTD.

——专业激光及光电产品代理商

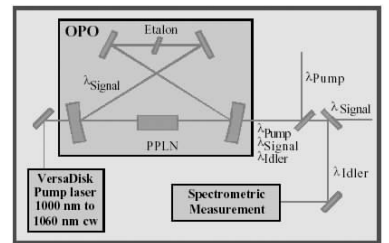
德国 ELS 公司

VersaDisk: 连续固体激光器, 采用德国斯图加特大学专利 Thin Disk 技术 (DE 19835107A1), 获得 Excellence Award 2003 大奖。

- 1030nm, 连续输出:
 - 输出功率: 5/10/20/30/50/100W, TEM₀₀ 模, 并有大于 50W 的单频输出 (线宽<5MHz)。
 - 波长可以在 1000-1060nm 范围选择。
 - 自锁模型 (采用可饱和吸收镜技术), 重复频率 100MHz, 脉宽 500fs。
 - 应用: 原子冷却, 光镊, 中红外高分辨率光谱 (与连续可调谐 OPO 一起使用)。
- 515nm, 连续输出: 可选 515/1030nm 双波长输出。
 - 单频输出功率 (线宽<5MHz): 2.5/5/10/15W, TEM₀₀ 模。
 - 波长可以在 514-517nm 范围选择, 可完全替代氩离子激光器。
 - 应用: 高功率钛宝石和染料激光器泵浦、绝对频标、干涉、全息、印刷。

SpectroStar: 高功率连续中红外 (2-5 μm) 参量振荡器 (OPO):

- 谱段范围: 2-5 μm ; 峰值输出功率: 3W@2954nm(泵浦功率 20W); 线宽: $<5 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ (15MHz); 连续扫描范围: 5cm^{-1} (150GHz)。
- 应用: 中红外高分辨率光谱, 如大气科学中的痕量气体分析, 光声光谱, 废气检测, 机载大范围陆地和海洋污染探测, 大气污染分析等。



欲了解我公司产品详细信息, 请参阅我公司网站: www.bjlaser.com

公司地址: 中国北京市朝阳区望京西园 222 号星源国际 B 座 1601 室

邮编: 100102

电话: 010-84718151/8152

传真: 010-64740680

电子邮件: sales@bjlaser.com