

Analysis on the Application of Two Dimensional Negative Refraction Photonic Crystals in Micro/Nano Optoelectronic Devices

Mengxue Li, Mengnan Liu, Chengyi Jiang, Zixuan Xu, Sheng Xu, Yong Wan*

College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong
Email: mengxueli_16@126.com, wanyongqd@hotmail.com

Received: Apr. 16th, 2017; accepted: Apr. 27th, 2017; published: Apr. 30th, 2017

Abstract

This paper briefly reviews the history of negative refraction, describes the two ways to realize negative refraction of photonic crystals, and especially introduces the application of two dimensional negative refraction photonic crystals in optical communication, optical detection and optical memory devices. Finally, the paper concludes that the two dimensional negative refraction photonic crystals have widespread application which benefits on the kinds of characteristic of negative refraction photonic crystals.

Keywords

Photonic Crystal, Negative Refraction, Optical Device, Optimization

二维负折射光子晶体在微纳光电器件中应用的分析

李梦雪, 刘梦楠, 姜澄溢, 徐紫璇, 徐胜, 万勇*

青岛大学物理科学学院, 山东 青岛
Email: mengxueli_16@126.com, wanyongqd@hotmail.com

收稿日期: 2017年4月16日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

*通讯作者。

文章引用: 李梦雪, 刘梦楠, 姜澄溢, 徐紫璇, 徐胜, 万勇. 二维负折射光子晶体在微纳光电器件中应用的分析[J]. 应用物理, 2017, 7(4): 103-110. <https://doi.org/10.12677/app.2017.74015>

摘要

本文在简单回顾负折射的研究历史上, 阐述了光子晶体实现负折射的两大途径, 并重点介绍了二维负折射光子晶体在光通信、光探测及光存储器件等方面的应用, 最后指出二维负折射光子晶体在光学器件上的广泛应用得益于多种负折射光子晶体特性。

关键词

光子晶体, 负折射, 光学器件, 优化

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1968年, Veselago [1]首先提出了负折射介质的概念, 1996年 Pendry 等[2]从理论上证明了按一定周期排列的金属开口谐振腔和金属线在某波段可实现负折射效应, 2001年 Smith 等[3]首次成功制备出这种具备负折射效应的介质。另一方面, 1998年 Kosaka 等人[4]发现, 在特定的波长范围内, 一个二维六角晶格光子晶体中可观察到负折射现象; 2000年, Notomi [5]深入研究了二维光子晶体模型中光束的传播, 通过不同方法获得了介质的等效负折射率; 2003年, Cubukcu 等人[6]进一步从实验上证实了微波波段中存在二维光子晶体负折射现象。早期的研究集中在二维介质光子晶体, 后来就扩展到二维金属光子晶体 [7] [8] [9]和三维光子晶体[10] [11]。一般来说, 一维光子晶体是周期排列的多层介质膜结构, 其带隙通常随着入射角度的改变而改变, 因而限制了它的应用范围。三维光子晶体的制作过程很复杂, 特别是在可见光和红外段制作这样的微纳结构, 往往需要引入特殊制备工艺。相比之下, 二维光子晶体能够实现光子晶体的多数特性要求, 同时可以利用标准的平面光波导技术制作, 因而受到极大的关注和广泛的应用, 具有很大的研究价值和应用背景。

本文通过总结二维负折射光子晶体在一些微纳器件中的主要应用, 发现其特性在器件优化方面的具有显著的优点, 提出了在微带天线中利用负折射光子晶体来减小天线尺寸及增大耦合效率等, 希望为以后光电子器件优化方面提供理论借鉴和技术指导。

2. 光子晶体实现负折射的基本途径

光子晶体实现负折射现象有以下两种途径[12]。图 1(a)为左手负折射(left hand negative refraction, LH⁻), 是由负折射率介质引起的, 折射光束的相速度和群速度方向相反, 其有效折射率为负数。图 1(b)称为右手负折射(right hand negative refraction, RH⁻), 通过对材料折射率的空间周期性的调制, 改变其色散关系来实现的, 折射光束的相速度和群速度方向夹角为锐角, 其有效折射率是大于零的。

对于 LH⁻材料来说[12], $v_{ph} \cdot v_{gr} < 0$, 而对于 RH⁻材料来说, $v_{ph} \cdot v_{gr} > 0$ 。这两种途径的实现原理是不同的[13] [14]: 第一种可以从能带结构和等频线两个角度分析。在图 2(a)的频带结构图中, 以第一布里渊区中心点 Γ 点为中心, 离开这个中心 Bloch 波矢 k 增大而频率 ω 减小, 从等频线结构图 2(b)分析, 等频线半径越大, ω 越小, 这些特征都表明光子晶体具有负折射的性质。因为光在光子晶体中的传播方向

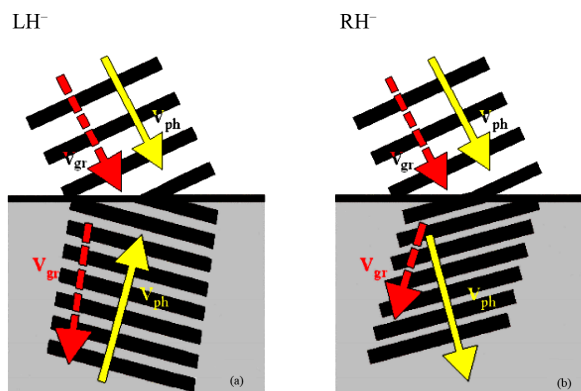


Figure 1. LH⁻ (a) and RH⁻ (b) refraction (the sign-denotes negative refraction)

图 1. 光子晶体中两种不同的负折射：(a) 左手负折射，(b) 右手负折射[12]

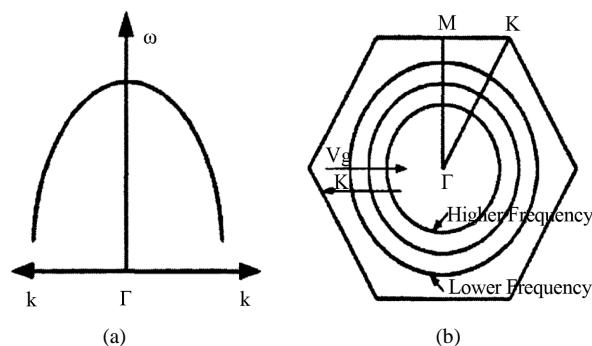


Figure 2. Analysis of the negative refraction of photonic crystals by using the (a) Band structure, and (b) equal frequency line chart

图 2. 利用(a) 频带结构图；(b) 等频线图分析光子晶体的负折射现象[24]

由群速度方向决定，而群速度矢量就是空间等频线的梯度矢量，见公式(1)。离开 Γ 点 k 增大而频率 ω 减小，意味着群速度与相速度相反，在这种光子晶体内部，Poynting 矢量与波矢 k 的点乘为负。这种特点类似于左手材料，负折射在所有角度都可以发生，被称之为全角度负折射(All angle negative refraction, AANR)。此情况下光子晶体的等频率曲线是圆的，即各项同性，则可以定义(负值)等效折射率。

$$v_g = \nabla_k \omega \quad (1)$$

第二种情况是以第一个布里渊区的某个角点为中心，离开这个中心 Bloch 矢量 k 增大而 ω 增大，Poynting 矢量与波矢的点乘为正。这种情况，入射光束只有选取了合适的入射角度和界面方向才能够产生负折射效应，可以理解为不具有等效负折射率的负折射现象。由于第一种是全角度负折射，而第二种是需要特定角度入射才会有负折射现象，所以第一种的应用的范围更广一些。

3. 二维负折射光子晶体的应用

1) 电光偏转器：其原理是通过特殊的电极结构，在晶体中形成垂直于光束传播方向梯度电场，根据电光效应产生折射率梯度，使光束发生偏转[15]。2016年，高伦等人[16]提出基于光子晶体及其负折射效应的电光偏转器，该偏转器通过电压来改变液晶折射率，进而控制出射光的偏转。文中采用的是梯形光

子晶体结构，介质柱的单元形状为圆柱体，呈三角形排列。图 3 和图 4 分别表示该光电偏转器的平面结构和侧面剖视图，仿真实验表明，在实现负折射的频率范围内，器件可以达到 20° 的较大偏转。

2) 光开关: 用光子晶体来实现全光开关的思想，最早是由 Scalora 在 1994 年提出来的[17]。2010 年，袁保国等人[18]用时域有限差分法研究了三角结构，文中的光子晶体是由在 GaAs 介质基底刻蚀上三角排列的空气孔构成，如图 5(a)所示，该结构的光子晶体的等效折射率常数随归一化频率变化曲线如图 5(b)所示。研究发现：工作频率为 0.3068 时，Bloch 波共振和受激辐射以及光子隧道贯穿极大地增强了自发辐射的几率，使能量被高度局域，从而获得明显的全光开关效应。进一步研究还发现，当二维光子晶体三角形结构的圆柱空气孔改为椭圆空气孔时，椭圆孔具有更高的品质因数，从而形成性能极优的光开关效应。

3) 开放式谐振腔: 开放腔结构是 Notomi 在 2000 年首先提出来的[5]，2006 年孙桂林等人[19]提出了一种由二维三角晶体光子晶体制作的开放腔结构如图 6，即由顶角 30° 楔角的光子晶体和空气槽交替组成。材料选用 GaAs (折射率 $n = 3.4$)，空气孔半径 r 取为 0.18，初始光源取高斯波束。结果表明，当取光子晶体材料的折射率为 4，半径 r 为 0.18 时，光子晶体开放腔在 0.6755-0.6851 归一化频率内具有负折射特性，并且在此归一化频率内可形成一个零光程的闭合回路，且在某一时刻进入开放腔的能量主要集中在空气槽中。因此，可以利用共振波长随着折射率变化而变化来实现生物测量[20]。

4) NR-PC 平板透镜: 基于负折射特性的 NR-PC 平板透镜具有亚波长成像特性，这种透镜能突破传统成像的“衍射极限”，极大地提高了成像分辨率，从而对微小结构可实现“完美成像”。该透镜体现了负折射光子晶体的自聚焦特性。2011 年徐阳等人[21]设计了两个 NR-PC 平板，选择光源归一化中心频率为 $f_c = 0.3068$ ，系统建模如图 7 所示。该研究得到的结论为：其板间距 S 的变化对系统再聚焦分辨率值的影响较小，即由两个 NR-PC 平板透镜组成的探测系统可以突破传统的衍射极限，具有很好的探测性能。

自聚焦的特性还有其他的应用，例如：分光镜和分束器等。2008 年陈沛等人[22]提出用空气中介质圆柱围成六角形二维三角晶格光子晶体，制作分光镜。在 2005 年 R.Gajic 提出[12]在空气中，用 Al_2O_3 介质柱组成的二维正方晶格光子晶体可以实现光束分离的作用。其光束传播示如图 8 所示。

5) 太赫兹波导: 2010 年张乐在论文中[23]研究了衬底为硅、纤芯为 TPX、包层有规律的掺入负折射率介质的情况下，正方晶格结构和三角晶格结构的光子晶体太赫兹波导的带隙的情况。其结构示意图如图 9(a)，得到的结论是：三角晶格和正方晶格负折射率介质光子晶体太赫兹波导都是适合太赫兹波传输的；负折射率介质占空比越大越利于该波导导光的实现，而三角形晶格结构比正方晶格结构容易产生光禁带，完全带隙的宽度和范围都比正方结构要大。

6) 低通滤波器: 曹始明等人[24]以二维三角晶格光子晶体作为研究对象，半径为 $0.40a$ 的空气圆柱在介电常数为 10.5 的介质背景中排列成二维三角晶格，其中 a 为晶格常数，所有的频率已经归一化为 $\omega a/2\pi c$ 。图 10(a)为了光子晶体在第二个导带的等频线，在第二个导带，等频线呈现比较规则的圆形，并且随着频率的减小，等频线由圆形逐渐接近正六边形，可以用等效介质理论来处理。另外，随着等频线半径的增大，归一化频率 ω 在逐渐减小，进一步验证了该频率的左手电磁特性。图 10(b)为光子晶体第二个导带的等效折射率随频率的变化曲线，在归一化频率 $\omega = 0.37$ 到 0.42 范围内存在相对自由空间表现光疏性质的折射率 ($|n| < 1$)，该频段可以实现全反射性的低通空间滤波器。

7) 隐身斗篷: 隐身斗篷的设计主要利用了电磁波的绕射，也即是引导电磁波绕过物体继续传播。人们对各种光子晶体结构中可能存在的负折射效应及其在光学隐身斗篷方面的应用激发了极大的研究兴趣。瑞典皇家工学院的 Berrier [25]等在 InP/GaInAsP/InP 平板波导上刻蚀了三角晶格空气圆孔的二维光子晶体，格子的周期常数为 480 nm，气孔半径为 125 nm，实验观测到 1.5 μm 波长左右的负折射现象。美国的一个研究小组提出利用一组同轴的硅光子晶体环[26]，可能接近实现“光学隐身斗篷”的特殊功能。

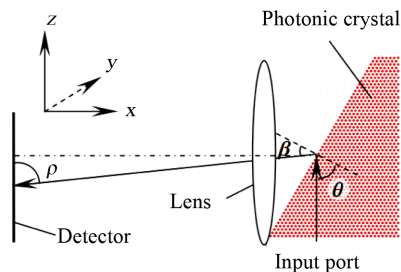


Figure 3. The plane structure of electro-optic deflector
图 3. 电光偏转器平面结构示意图[16]

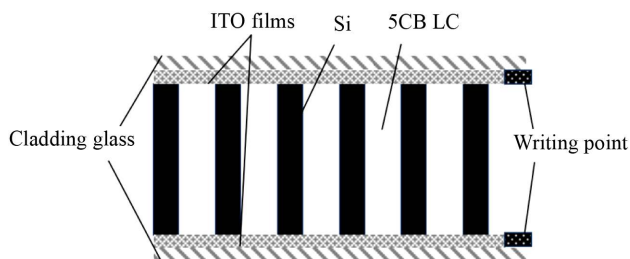
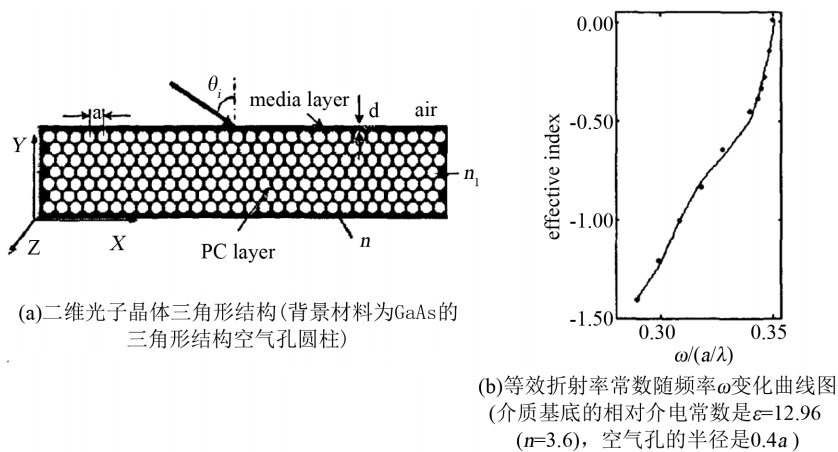


Figure 4. The structure of electro-optic deflector from cutaway views
图 4. 电光偏转器结构剖视图[16]



(a)二维光子晶体三角形结构(背景材料为GaAs的三角形结构空气孔圆柱)

(b)等效折射率常数随频率 ω 变化曲线图
(介质基底的相对介电常数是 $\epsilon=12.96$
($n=3.6$), 空气孔的半径是 $0.4a$)

Figure 5. Schematic diagram of the photonic crystal and the variation curve of the equivalent refractive index constant with frequency

图 5. 该光子晶体的结构示意图及等效折射率常数随频率 ω 变化曲线图[18]

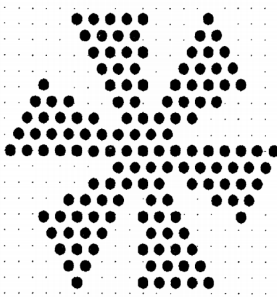


Figure 6. Plane of photonic crystal cavity
图 6. 光子晶体开放腔的平面图[19]

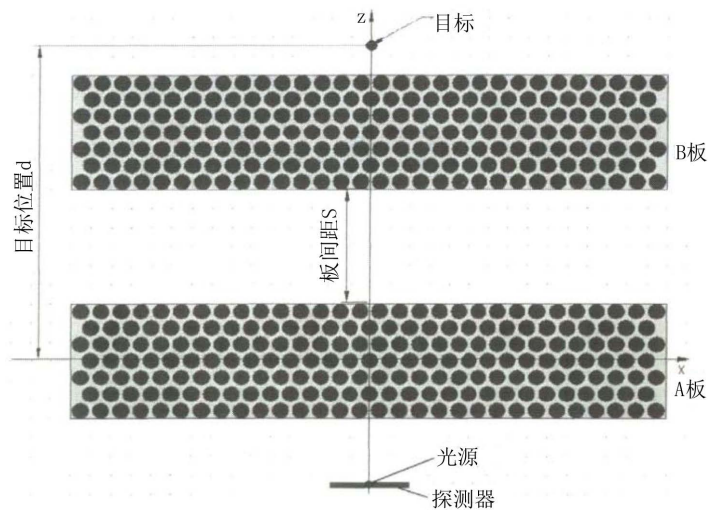


Figure 7. Scanning detection system composed of two NR-PC plates
图 7. 两个 NR-PC 平板组成的扫描检测系统[21]

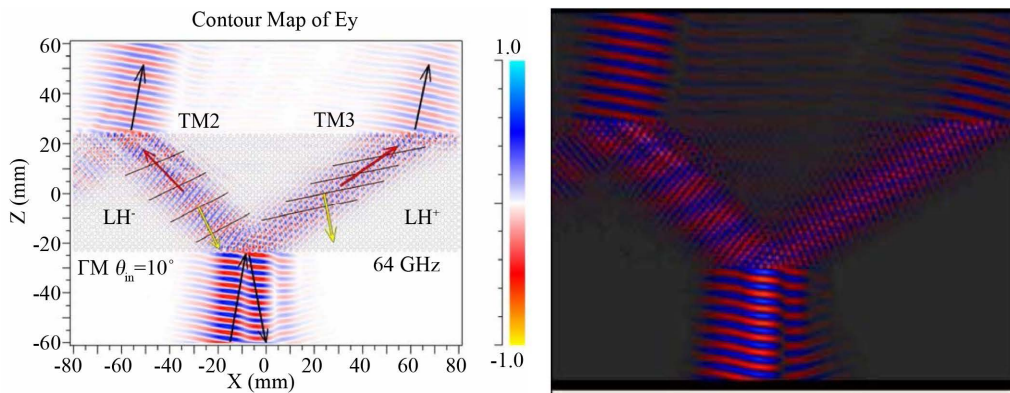


Figure 8. Schematic diagram of negative refraction photonic crystal beam splitter
图 8. 负折射光子晶体分束器的示意图[12]

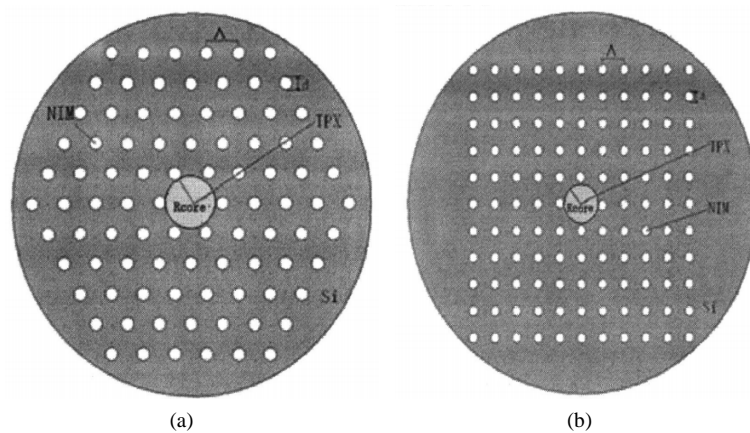


Figure 9. (a) Negative refractive index dielectric photonic crystal terahertz waveguide with triangular structure; (b) Affirmative structure of negative refractive index photonic crystal terahertz waveguide

图 9. (a) 三角形结构的负折射率介质光子晶体太赫兹波导; (b) 正方结构负折射率介质光子晶体太赫兹波导[23]

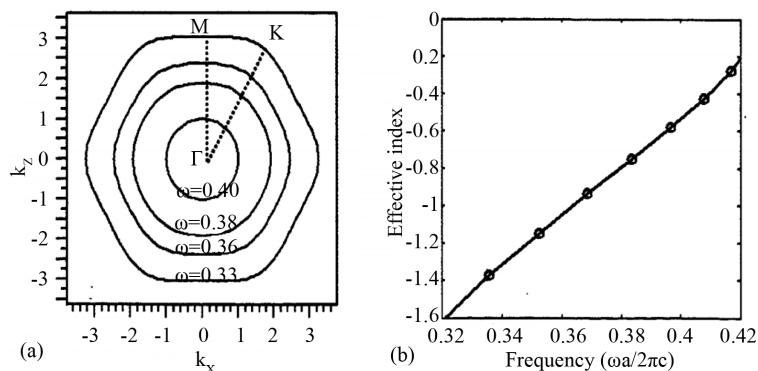


Figure 10. (a) The contour map of negative refraction photonic crystal; (b) Effective refractive index of the second conduction band

图 10. 具有负折射性质光子晶体的(a) 等频线图; (b) 第二导带的等效折射率[24]

4. 总结

二维负折射光子晶体在光学器件上的广泛应用得益于其多种特性，主要的是其与左手材料相关的自聚焦特性、反常多普勒效应及反常切伦科夫辐射等，以及光子晶体本身所具有的共振激发和相干热辐射等性质。在光学器件的优化方面也离不开这些特性。

例如，韩丽萍等人[27]提出了一种小型化差分微带天线。在天线覆层添加一种哑铃型开口环金属线复合周期结构的左手材料，改善了天线的带宽、辐射性能。但是其缺点也很突出：左手材料结构太复杂，仿真慢。而采用二维光子晶体作覆层，通过改变其晶格常数和形状以及介质的介电常数来实现类似于左手材料的功能。同样的，将滤波器各组成部分放置在二维负折射光子晶体中，这样能够有效的减小滤波器的尺寸；或者在线缺陷主波导后放置正负折射率相间的介质柱，对于其禁带频率内的光反射极强，增加了此频率带内的耦合效率，进一步优化了滤波效果。例如刘杰等人[28]在二维三角晶格光子晶体中设计了一款由线缺陷主波导、环形谐振腔、60°弯下载波导组成的多信道下载滤波器，优化后各目标频率光信号的透射率均达 90% 以上。

就现今技术而言，二维负折射光子晶体在缩小光子电路尺寸方面有巨大潜力；而通过引入各种功能缺陷，实现不同的功能、并增强其特性，会使结构功能得到显著的提高和优化。

基金项目

国家自然科学基金(11144007)和山东省自然科学基金(ZR2016AM27)。

参考文献 (References)

- [1] Veselago, V.G. (1968) The Electrodynamics Substances with Simultaneously Negative Vales of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, **10**, 509-514. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>
- [2] Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J., *et al.* (1996) Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. *Physical Review Letters*, **76**, 4773-4776. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4773>
- [3] Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., *et al.* (2000) Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, **84**, 4184-4187. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [4] Kosaka, H., Kawashima, T., Tomita, A., *et al.* (1999) Superprism Phenomena in Photonic Crystals: Toward Microscale Lightwave Circuits. *Physical Review B*, **58**, R10096-R10099. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.R10096>
- [5] Notomi, M. (2000) Theory of Light Propagation in Strongly Modulated Photonic Crystals: Refractionlike Behavior in the Vicinity of the Photonic Band Gap. *Physical Review B*, **62**, 10696-10705. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.10696>

- [6] Cubukcu, E., Aydin, K., Ozbay, E., *et al.* (2003) Sub-Wavelength Resolution in a Two-Dimensional Photonic-Crystal-Based Superlens. *Physical Review Letters*, **91**, Article ID: 207401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.207401>
- [7] Zhang, X. (2004) Image Resolution Depending on Slab Thickness and Object Distance in a Two-Dimensional Photonic-Crystal-Based Superlens. *Physical Review B: Condensed Matter*, **70**, 110.
- [8] Zhang, X. (2004) Absolute Negative Refraction and Imaging of Unpolarized Electromagnetic Waves by Two-Dimensional Photonic Crystals. *Physical Review B*, **70**, Article ID: 205102. <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.205102>
- [9] Hu, X. and Chan, C.T. (2004) Photonic Crystals with Silver Nanowires as a Near-Infrared Superlens. *Applied Physical Letters*, **85**, 1520-1522. <https://doi.org/10.1063/1.1784883>
- [10] Luo, C., Johnson, S.G. and Joannopoulos, J.D. (2003) Negative Refraction without Negative Index in Metallic Photonic Crystals. *Optics Express*, **11**, 746-754. <https://doi.org/10.1364/OE.11.000746>
- [11] Luo, C., Johnson, S.G. and Joannopoulos, J.D. (2002) All-Angle Negative Refraction without Negative Effective Index. *Physical Review B*, **65**, Article ID: 201104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.201104>
- [12] Gajic, R., Meisels, R. and Kuchar, F. (2005) Refraction and Rightness in Photonic Crystals. *Optics Express*, **13**, 8596-8605. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.008596>
- [13] Foteinopoulou, S. and Soukoulis, C.M. (2002) Negative Refraction and Left-Handed Behavior in Two-Dimensional Photonic Crystals. *Physical Review B: Condensed Matter*, **67**, 289-289.
- [14] 唐志祥. 二维光子晶体的反常折射现象及其应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2007: 18-30.
- [15] 许发明, 范滇元, 陈绍和, 邓锡铭. LiNbO₃ 电光偏转器的研究[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 369-372.
- [16] 高伦, 梁斌明, 王婷, 等. 光子晶体负折射效应的电光偏转器[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 77-81.
- [17] Scalora, M., DoMing, J.P., Bowden, C.M., *et al.* (1994) Optical Limiting and Switching of Ultrashort Pulses in Nonlinear Photonic Band Gap Materials. *Physical Review Letters*, **73**, 1368-1371. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.1368>
- [18] 袁保国, 孙静, 沈廷根. 光子晶体的等效负折射与椭圆孔的光开关效应[J]. 激光与红外, 2010, 40(5): 527-531.
- [19] Sun, G., Bakhtazad, A., Jugessur, A., *et al.* (2006) Open Cavities Using Photonic Crystals with Negative Refraction. *Photonics North*, **6343**, 63433M-63433M-8. <https://doi.org/10.1117/12.708026>
- [20] 张芬. 光子晶体负折射特性及其应用的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2010: 31-49.
- [21] Yang, X., Lian, Y., Shen, T., *et al.* (2011) Two-Square Target Detection and Imaging Using NR-PC Flat Lens. *Optical and Quantum Electronics*, **42**, 347-357. <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9466-7>
- [22] 陈沛, 孔凡敏, 李康, 等. 二维光子晶体负折射现象条件及特性研究[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 721-724.
- [23] 张乐. 负折射率介质光子晶体 THz 波导传输特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2010: 27-41.
- [24] 曹始明, 唐志祥, 罗朝明, 等. 基于光子晶体的低通空间滤波器的研究[R]. 第十九届全国激光学术会议: 09N3.49.
- [25] Berrier, A., Mulot, M., Swillo, M., *et al.* (2004) Negative Refraction at Infrared Wavelengths in a Two-Dimensional Photonic Crystal. *Physical Review Letters*, **93**, Article ID: 073902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.073902>
- [26] Xiao, D. and Johnson, H.T. (2008) Approximate Optical Cloaking in an Axisymmetric Silicon Photonic Crystal Structure. *Optics Letters*, **33**, 860-862. <https://doi.org/10.1364/OL.33.000860>
- [27] 韩丽萍, 赵亚娟, 曲美君. 基于左手材料的小型化差分微带天线[J]. 测试技术学报, 2014, 28(2): 163-167.
- [28] 刘杰, 铁生年, 卢辉东. 多信道二维光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1021-1027.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org