

光子晶体红外隐身材料研究进展

张源昆, 于名讯, 潘士兵, 黄成亮, 刘忠刚
(中国兵器工业集团第五三研究所, 山东 济南 250031)

摘 要: 红外探测在军事中已广泛应用。如何降低军事目标被红外探测和发现的几率已成为一个亟待解决的问题。光子晶体作为一种新型的人工结构材料, 因其具有光子禁带的高反射、低辐射特性, 在红外隐身领域具有广阔的应用前景。简述了光子晶体的基本概念和主要特性, 重点介绍了国内外可用于红外隐身领域的光子晶体的研究状况。

关键词: 光子晶体; 红外; 隐身材料

中图分类号: TN213 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.01

Development of photonic crystal infrared stealth materials

ZHANG Yuan-kun, YU Ming-xun, PAN Shi-bing, HUANG Cheng-liang, LIU Zhong-gang
(CNGC, Institute 53, Ji'nan 250031, China)

Abstract: Infrared detection has been widely used in military area. How to reduce the probability of military targets from being detected and discovered by infrared detector has become an urgent problem. As a new kind of artificial structure material, photonic crystals have wide applications in the infrared stealth field because of its high reflectivity of the photonic band gap and low radiation characteristics. The basic concept and characteristics of photonic crystals are presented and the research status of photonic crystals are reviewed.

Key words: photonic crystal; infrared; stealth materials

1 引 言

隐身技术是当今世界三大尖端军事技术之一, 其中红外隐身技术占据了很大比重。红外隐身材料可降低或改变目标的红外辐射特征, 从而实现对目标的低可探测性。传统的红外隐身方法主要依赖于材料的自身属性。近年来, 在运用传统方法实现红外隐身的同时, 研究人员也在不断地探索新型的、更有效的红外隐身方法。光子晶体作为一种新型的人工结构材料, 因其具有光子禁带的高反射、低辐射特性, 在红外隐身领域具有广阔的应用前景, 因而成为当今红外隐身材料研究的热点。

2 光子晶体基本概念

1987年, Yablonovitch^[1]从理论上预言了晶体中光子禁带的存在, 几乎是在同时, John^[2]报道了电介质超晶格中有一种很强的 Anderson 局域光子存在, 这两位先驱的工作为光子晶体的理论奠定了基础。

光子晶体 (Photonic crystal) 由不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期排列而成, 与半导体具有电子能带和带隙一样, 光子晶体也具有光子能带及光子带隙 (Photonic band gap, PBG), 当光的频率位于光子带隙范围内, 它将不能在光子晶体中传播。一般可根据介质排列的空间构型, 将光子晶体分为一维、二维和三维光子晶体。

3 光子晶体的特性

光子晶体有两大特性, 第一个重要特性是光子禁带。在合适的晶格常数和介电常数比的条件下, 类似于电子能带隙, 在光子晶体的光子能带间可出现使某些频率的电磁波完全不能透过的区域, 将此频率区域称为光子禁带。光子晶体若要对某频率波

作者简介: 张源昆 (1988 -), 男, 在读硕士, 主要从事隐身材料方面的研究工作。E-mail: fylkzykk@foxmail.com

收稿日期: 2013-01-17

段光存在禁带效应,必须同时满足三个条件:(1)介电常数周期性变化,也即具有周期性结构。(2)介电常数变化幅度大,一般认为两种材料介电常数比值大于 2 时才会有禁带效应。(3)介电常数变化周期与光的波长可相比拟,即周期与禁带对应的光的波长在同一个数量级。

光子晶体的第二个重要特性是光子局域,又叫 Anderson 局域。如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷,那么和缺陷态频率一致的光子就会被局域在缺陷位置,一旦偏离其缺陷处光将迅速衰减,那么这个缺陷就称作光子局域。假如光子晶体理想无缺陷,根据边界条件的周期性要求,不存在光的衰减模式。但是,一旦光子晶体原有的对称性遭到破坏,光子禁带中就可能出现频率极窄的缺陷态。

光子晶体的其他特性还包括超棱镜效应和负折射率效应。在半导体晶体中电子能带上部出现负的有效质量态,下部出现正的有效质量态。而且在半导体中,能带带隙区域附近 Bloch 电子变得类似于自由电子。同样在强周期性调制的光子晶体中,也会出现类似的现象,即在光子带隙附近,尽管存在强散射,但 Bloch 光子同样变得与自由光子类似。这样在光子带隙附近的光的传播就可以用 Snell 定律来描述。在带隙附近区域的一些异常光学传播行为等均可得到解释,即有效相折射率是由光子能带结构确定的。它可能是负值或非整数,导致如超棱镜效应、负折射率等异常现象。

4 红外隐身光子晶体研究现状

4.1 国外研究状况

自从光子晶体的概念提出以来,科研人员就在不断的探索利用光子晶体实现对特定频率波段的光的抑制、调制等。这些理论和研究成果都可以直接或间接的应用于红外隐身中。1991 年, Yablono-vitch^[3] 制作了第一块光子晶体,他所采用的方法是在折射率约为 3.6 的 Si、GaAs 等材料上用机械方法钻出许多直径为 1mm 的孔并呈周期性分布最终得到三维结构光子晶体。并且指出该类结构材料可阻止从毫米波段到紫外波段的电磁波从任何方向传播出去,从而证实了“光子禁带”的存在。1998 年,美国 Sandia 和 Ames 实验室的 S. Y. Lin 等^[4] 使用高折射率多晶硅通过激光刻蚀后制成栅栏状采用层层堆积的方法制备成 woodpile 结构光子晶体,该结构在 10 ~ 14.5 μm 波段出现一条很宽的光子禁带,对该波段光单位衰减可达约 12 dB,并且当光分别以 0°、30°、40°、50°、60° 角度入射时,其反射率均可以达到

90% 以上如图 1 所示。2001 年, B. Temelkuran 等^[5] 研究全向反射镜制备的一维光子晶体的两个带隙首次在 4.5 ~ 5.5 μm 和 8 ~ 12 μm 两个红外大气窗口上对任意偏振态实现了全角度反射。

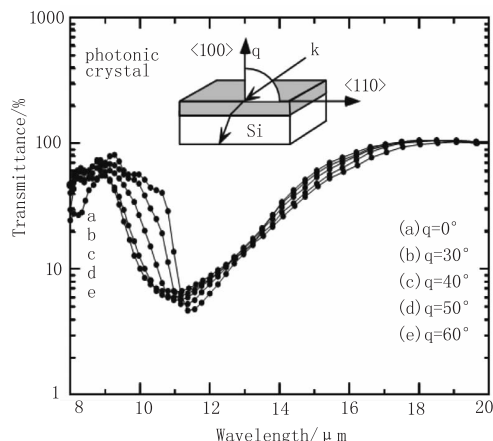


图 1 多晶硅木堆结构光子晶体在不同角度入射时的投射光谱图

Fig. 1 polycrystalline silicon woodpile PCs with different incident angle

2002 年,美国 Sandia 和 Ames 实验室的成员 Fleming 等^[6] 报道了他们采用化学气相沉积法制备的全金属(钨)宽带隙(8 ~ 20 μm 的光谱反射率均大于 90%) woodpile 结构全反射的三维光子晶体如图 2 所示。其中,在 12 μm 波段单位反射可达约 30dB,利用该光子晶体可以很好地实现抑制红外辐射。2005 年, S. Enoch 等^[7] 分别通过气相沉积法和激光刻蚀法将 Au、ZnSe 制成栅栏片层状,采用厚度 2 mm 直径 15 mm 的抛光 ZnSe 作为基底,通过简单的层层堆积方法制成金属-介质三维光子晶体,通过测试发现该样品可在 7 ~ 12 μm 红外波段表现出较好的热辐射控制性。Robert. P. Drupp 等^[8] 采用铝和聚酰亚胺基底设计了单层金属-介质光子晶体,通过优化铝的大小形状以及空间位置从而实现了在中远红外波段达到非常好的禁带效果。

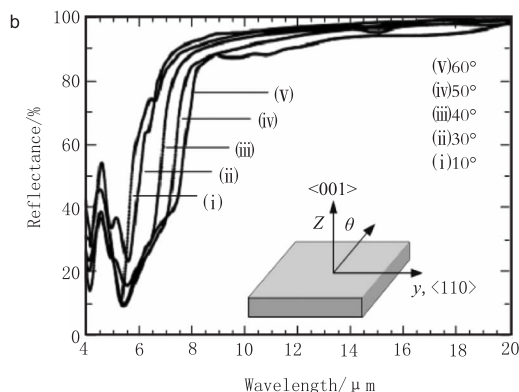


图 2 钨木堆结构光子晶体在光不同角度入射时的反射光谱

Fig. 2 the reflection spectra of All-Tungsten woodpile PCs with different incident angle

Ken Kuriki 等人^[9]采用气相沉积方法制备了由聚醚砜树脂(PES)和三硒化二砷(As_2Se_3)制备而成的二维光子晶体纤维。通过表征发现单根直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的纤维在 $3\sim 3.7\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内的反射率接近 100% , 直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的单根纤维在 $1.4\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围内的反射率接近 100% 。除了通过减少材料的热辐射和增强红外反射来实现隐身外, 还可以通过将热辐射能转换成其他形式的能源(例如电能)来实现隐身。

2005 年, A. E. Aliev 等^[10]使用硫系玻璃 AMTIR-1 填充 SiO_2 蛋白石晶体除去模板制成反 opal 光子晶体, 通过适当的控制晶格参数和填充率, 可以使该结构光子晶体在中红外和远红外波段产生完全光子带隙。2006 年, 他们又对这一可用作红外隐身颜料的光子晶体进行了详细报道, 并给出了该光子晶体的制备方法, 经实际测试, 其样品在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 两个红外大气窗口波段的反射率可达 90% 以上^[11]。这种光子晶体低辐射率材料具有良好的电磁波兼容性。在不改

变介质化学组成的条件下, 这种光子晶体的高反射波段可以通过调节反蛋白石结构的周期数进行灵活调控, 具有传统低辐射率涂料无法比拟的优点。

4.2 国内研究状况

我国虽然在红外光子晶体领域的研究起步较晚, 但一些院校和科研机构也取得了一定的成果。2004 年, Yu Junfei 等^[12]报道了他们使用金属材料 Ag 和 MgF_2 制备的一维光子晶体可以实现在可见光和近红外波段的吸收调制, 而且吸收率随着光子晶体周期数的增加而增加如图 3 所示。2007 年, 刘广平等^[13]采用钨和二氧化硅设计了一维金属-介质光子晶体, 从理论上研究了光子晶体的光谱选择控制特性, 可用于实现热辐射控制。Wang Zhejin 等^[14]人利用高低折射率的多孔硅交替排列而制成一维光子晶体, 并从实验和理论上研究了其在红外区域的光学特性, 得到了中心波长在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、带宽为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的光学带隙, 从而为其在红外热阻隔方面的应用提供了有益的探索。

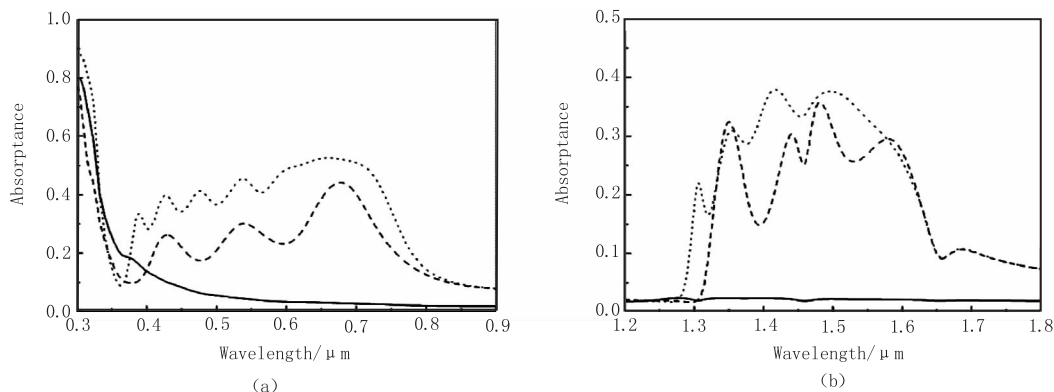


图3 (a) Ag/MgF_2 一维光子晶体 4 周期(线虚线)和 8 周期(点虚线)在可见光波段的吸收光谱
(b)在近红外波段的吸收光谱. 实线为基底材料 Ag 的吸收光谱

Fig.3 (a) calculated absorptance spectra of 1D Ag/MgF_2 PCs with 4(dashed curve) and 8 periods (dotted curve)
(b) absorptance spectra in NIR. Solid curve stands for absorptance of Ag film

2008 年, 赵大鹏等^[15]采用异质结构方法设计了由碲和聚乙烯材料组成的中远红外双波段光子晶体, 与 B. Temelkuran 等^[5]设计的光子晶体相比具有更宽的光子带隙, 在 $3.4\sim 5.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $7.9\sim 12.2\text{ }\mu\text{m}$ 两个波段实现了对任意偏振态的全反射, 相对带宽分别达到了 49.6% 和 42.3% 。并且通过进一步改进材料的填充比将全向反射的波段拓展为 $3.4\sim 5.4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$, 相对带宽分别达到 49.8% 和 43.1% , 完全能够适应各种中红外和远红外的应用需求。刘必鑫^[16]等利用 CdSe , SiO_2 设计出在中远红外波段具有高反射禁带的一维光子晶体, 并通过构造双周期异质结 CdSe/SiO_2 光子晶体, 获得了光子带隙的拓宽, 实现了在中远红外双波段的高反

射。其中在 $3.14\sim 5.57\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8.16\sim 13.96\text{ }\mu\text{m}$ 两个波段的光谱反射率都大于 95% , 较好地满足了中远红外双波段伪装兼容的要求如图 4 所示。

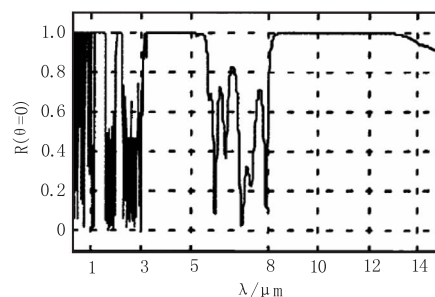


图4 双周期异质结一维光子晶体反射光谱
Fig.4 the reflection spectra of multi-cycle heterojunction 1D photonic crystal

2010 年,李宇杰等^[17]采用 1860 nm 直径的 SiO₂ 微球,以对流自组装方法制备胶体晶体作为模板,通过 LPCVD 法填充 Si 制备得到中红外波段全角度 Si 反蛋白石三维光子晶体。经显微红外反射光谱测试该反 opal 光子晶体具有明显的光学反射峰,表现出光子禁带效应。其带隙中心波长分别为 3319, 3571 和 5257 nm。测试的光学性能与理论计算基本符合。其中,在中心波长 3319 nm 处实现了全角度反射。

2011 年,高永芳等^[18]通过“光谱挖空”的方法利用薄膜光学的特征矩阵研究设计出一维掺杂光子晶体,该光子晶体可实现远红外和 10.6 μm 激光的兼容隐身。Zhao Xuanke^[19]等使用 PbTe 和 Na₃AlF₆ 通过交替镀膜设计出从近红外到远红外波段高反射且在两个激光波段高透过的一维双缺陷膜的光子晶体,该结构在 1 ~ 5 μm 和 8 ~ 14 μm 两个波段的反射率可达 99% 以上,并且对 1.06 μm 和 10.6 μm 激光的透过率可达 96% 以上如图 5 所示。

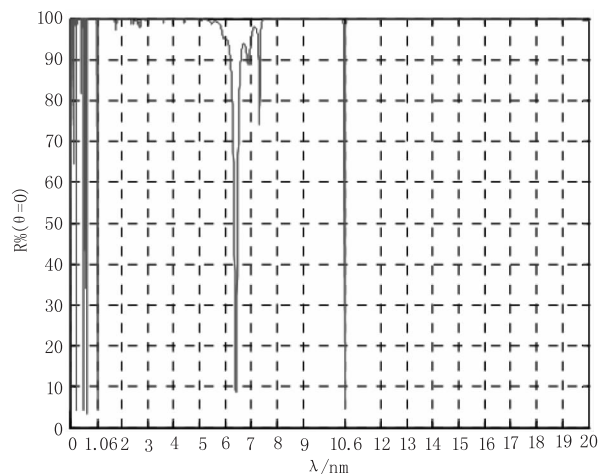


图 5 多周期双异质结一维光子晶体反射光谱图

Fig. 5 the reflection spectra of multi-cycle dual-heterojunction photonic crystal

5 结束语

综上所述,可用于隐身领域的红外光子晶体的发展趋势也和大多数隐身材料一样是“多波段、全方位、多功能、低成本”。也许是出于保密的原因,目前还没有光子晶体隐身材料应用于军事领域的报道。光子晶体具有“超低辐射-超高反射”特性,但是要想实现光子晶体在军事隐身领域的应用,必须要探索解决以下三个问题:

(1) 制备高质量的红外波段的三维光子晶体。制备高质量红外波段三维光子晶体一直以来都是难点,目前常用的方法有激光直写技术和胶体自组装技术,但这两种方法都有各自的缺点和局

限性。

(2) 光子晶体红外隐身材料的应用。是以薄膜(贴片)还是以涂料还是其他方式去应用到装备上。不同的应用方式就要考虑不同的使用条件、影响因素等。例如,将三维光子晶体使用在涂料中,那么就要考虑将其研磨成多大尺寸的颗粒、颗粒的大小对其性能的影响、哪种溶剂能使它充分的分散、掺杂后对其性能的影响、涂料的耐候性以及其在金属表面的附着力以及机械强度等问题。

(3) 光子晶体红外隐身材料规模化生产。尽管光子晶体有很多种制备方法,但是由于使用的设备和原材料昂贵、生产过程环境条件要求苛刻,所以目前仅限于实验室中小规模制备。光子晶体要想实现大规模的生产,不仅取决于制备工艺的改进,也需要生产设备的改进和原材料制备工艺的改进。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58:2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2486-2489.
- [3] E Yablonovitch, T J Gmitter, KM Leung, et al. 3-dimensional photonic band structure [J]. Chapman & Hall. 1992, 92:273-283.
- [4] S Y Lin, J G Fleming, D L Hetherington, B K Smith, et al. photonic crystal operating at infrared wavelengths [J]. Nature, 1998, 398(16):251-253.
- [5] B Temelkuran, E L Thomas, JD Joannopoulos, et al. Low-loss infrared dielectric material system for dual-range omnidirectional reflectivity [J]. Opt. Lett., 2001, 26: 1370-1372.
- [6] Fleming J G, Lin S Y, et al. All metallic three dimensional photonic crystals with a large infrared band gap [J]. Nature, 2002, 52:417.
- [7] S Enoch, J J Simon, L Escoubas, et al. Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission [J]. Appl. Phys. Lett. 2005, 86(26):1-3.
- [8] Robert P Drupp, Jeremy A Bossard, Yong-Hong Ye, et al. Douglas H. Werner, Dual-band infrared single-layer metaldielectric photonic crystals [J]. Appl. Phys. Lett. 2004, 85(10):1835-1837.
- [9] Ken Kuriki, Ofer Shapira, Shandon D, et al. Hollow multi-

- layer photonic bandgap fibers for NIR applications [J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1510 – 1517.
- [10] A Aliev, E Yablonovitch. Infrared photonic crystals on the base of chalcogenide glass inverse opal [C]. American Physical Society, APS March Meeting, 2005: 21 – 25.
- [11] A Aliev, A Zakhidov, R Baughman, et al. Chalcogenide inverted opal photonic crystal as infrared pigments [J]. Inter-mat. J. Nanosci, 2006, 5(1): 157 – 172.
- [12] Yu Junfei, Shen Yifeng. Absorption in one dimensional metallic dielectric photonic crystals [J]. Phys. Condens. Matter 2004. 16: 51.
- [13] Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge, et al. Thermal radiation spectral control by one dimensional metallodielectric photonic crystal [J]. Engineering Thermophysics, 2007, 28(3): 475 – 477.
- [14] Wang Z J, Zhang J, Xu S H, et al. 1D Partially Oxidized Porous Silicon Photonic Crystal Reflector for Mid-infrared Application [J]. Phys D: Appl Phys, 2007, 40: 4482 – 4484.
- [15] Zhao Dapeng, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Design on a Dual-band omnidirectional reflector of MWIR and LWIR [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 455 – 457. (in Chinese)
赵大鹏, 时家明, 汪家春, 等. 中长波红外双波段全向反射镜的设计 [J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 455 – 457.
- [16] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Kind of infrared camouflage material based on photonic crystals [J]. Infrared Technology, 2008, 30: 512 – 515. (in Chinese)
刘必璠, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的红外伪装材料 [J]. 红外技术, 2008, 30: 512 – 515.
- [17] Li Yujie, Xie Kai, Xu Jing, et al. Fabrication of silicon inverse opal photonic crystal with a complete photonic band gap in mid infrared range and its optical properties [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(02): 1082 – 1086. (in Chinese)
李宇杰, 谢凯, 许静, 等. 中红外完全带隙 Si 反蛋白石光子晶体的制备与光学性能研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(02): 1082 – 1086.
- [18] Gao Yongfang, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Design and fabrication of a kind of far infrared and 10.6 μm laser band compatible camouflage material based on photonic crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 3101 – 3104. (in Chinese)
高永芳, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的远红外与 10.6 μm 激光兼容伪装材料的设计与制备 [J]. 光学学报, 2011, 31(6): 3101 – 3104.
- [19] Zhao Xuanke, Zhao Qingwu, Wang Lianfen, et al. Laser and infrared compatible stealth from near to far infrared-bands by doped photonic crystal [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1668 – 1672.