

# 光子晶体在隐身技术领域的应用研究进展

许 静, 杜盼盼, 李宇杰

(国防科学技术大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**光子晶体是一类电介质材料周期性排列形成的新型人工结构功能材料, 具有独特的调控光子传播的特性, 在隐身技术领域具有重要的应用前景。本文主要介绍了光子晶体的基本特性以及在隐身技术领域的应用研究状况。

**关键词:**光子晶体; 光子带隙; 隐身技术

**中图分类号:** O799      **文献标识码:** A

## Progress on the camouflage application of photonic crystals

XU Jing, DU Pan-pan, LI Yu-jie

(Department of Material Engineering and Applied Chemistry,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Photonic crystals are a new kind of man-made structure function materials composed of ordered dielectric materials. For their unique properties to control light propagation, photonic crystals may find applications in camouflage. The properties and applications in camouflage of photonic crystals are emphasized in this paper.

**Key words:** photonic crystals; photonic band gap; camouflage

### 1 引 言

光子晶体是近年来迅速发展起来的一种介电常数随空间周期性变化的新型光学微结构材料。在光子晶体中, 由于介电常数在空间的周期性变化, 存在周期性势场, 当介电常数的变化幅度较大且与光的波长相比拟时, 介质的布拉格散射将产生光子禁带<sup>[1-2]</sup>, 频率处于禁带内的光无法传播而被完全反射, 而频率处于通带内的光波将可完全透过。因此, 光子晶体对禁带频率的电磁波具有选择性的高反射特性, 同时, 光子晶体还能抑制介质在禁带频率的自发辐射。与光谱选择性难以调节和控制的传统材料不同, 光子晶体对电磁波的传播特性以及自发辐射的控制都是通过其周期性微结构实现的, 不仅能赋予材料独特的光谱性能, 且其光谱性能在较大范围内可通过结构的周期尺寸进行调控, 光子晶体的独特性质及其可设计性, 使其在控制电磁波方面具有传统材料难以比拟的优势。现有的探测技术都是建立在发现和识别目标的电磁波特征信号的基础上

的, 因此, 利用光子晶体结构的设计控制或改变目标的电磁波特征达到隐身目的具有诱人的应用前景。本文简单介绍了光子晶体的基本特征, 重点阐述了光子晶体应用于隐身技术的基本原理以及国内外光子晶体隐身技术的研究进展。

### 2 光子晶体的基本特性

光子晶体的禁带特性。光子晶体的最根本特性就是具有光子禁带, 一定频率的光不能在光子晶体中传播, 这意味着处于禁带中的入射电磁波将被全反射。光子禁带的存在可以控制自发辐射。自发辐射的几率与光子所在频率的态的数目成正比, 当光子晶体中原子的自发辐射光频率正好落在光子晶体的带隙中时, 由于该频率光子态的数目为零, 自发辐射几率为零, 自发辐射就会完全被抑制。

光子晶体的另一个重要特征是“光子局域”。

作者简介: 许 静 (1971 -), 女, 博士, 副教授, 研究方向为光子晶体。E-mail: xujin503@163.com

收稿日期: 2009-05-22

在光子晶体中引入杂质和缺陷,在光子禁带中将产生相应的缺陷能级。和缺陷能级频率吻合的光子被限制在缺陷位置,而不能向空间传播,这样在光子晶体的禁带中央出现带宽极窄的缺陷态。通过在光子晶体中加入杂质,光子禁带中就会出现品质因子非常高的杂质态,具有很大的态密度,这样便可以实现自发辐射的增强。

光子晶体的反常折射现象。许多研究表明,在光子晶体带隙附近区域出现一些异常光波传播行为,如透射波群速度为负时,出现透射波和入射波在法线同侧的负折射现象;入射角固定,入射波频率小的改变引起透射角大的变化的超棱镜现象等。

### 3 光子晶体应用于隐身技术的基本原理和研究进展

#### 3.1 光子晶体应用于高温目标的热红外隐身

根据热辐射理论,目标的红外辐射强度取决于目标的热力学温度和表面发射率两个因素。因此,降低目标红外辐射强度可以通过降低其表面发射率和温度控制两种途径来实现。现有方法主要有物理降温、引流、采用低发射率红外涂料等。对于持续高温目标如坦克或导弹装载车的尾气口,由于热累积效应,这些方法的效果均不理想。光子晶体概念的出现为高温目标的热红外抑制问题提出了一种新的解决途径。光子晶体的最根本特性就是具有光子禁带,能够抑制其禁带频率自发辐射,同时能够增强其带边或通带的自发辐射。利用禁带位于红外探测器敏感波段( $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ )的光子晶体,可以有效抑制红外探测器可探测波段的辐射,并将辐射能量转变成其他不容易被探测到波段的能量,通过辐射频率的转换和调制,实现热红外隐身的目的。2007年,美国 Louisiana State University 的 Department of Physics & Astronomy 的一个研究小组提出将光子晶体用于高温尾气喷口的红外辐射抑制(如图1所示),利用光子晶体禁带的抑制自发辐射特性,把宽波段的热辐射( $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ )转换至光伏电池的工作波段的辐射( $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ),并采用光伏或热光伏电池将该部分辐射能转化为电能,可以在消耗尾气口废热降低目标红外特征信号的同时为装备提供部分电能。虽然这目前只是一种设想,但光子晶体能够实现热辐射的控制已经由能源转换领域的研究得到证实。2003年,美国 Sandia 实验室的 S-Y Lin<sup>[3]</sup> 等人报道了他们制备的木堆结构的金属钨光子晶体的发射光谱测试实验结果,光子晶体在禁带频率的宽带热辐射( $3 \sim 10 \mu\text{m}$ )被显著抑制,而其通带( $1.5 \sim 1.9 \mu\text{m}$ )频率的辐射被显著增强,发

射谱的宽度比黑体窄 2.5 倍,预计可将 GaSb 热光伏系统的光电转换效率提高到 34%。2004年,日本 TOHOKU 大学的一个研究小组研究了钨二维光子晶体结构表面对热辐射的控制作用,研究表明,与普通平板钨相比,钨二维光子晶体结构表面能选择性地增强其近红外波段的辐射,大大提高辐射光谱与光伏电池工作频率的匹配性,从而提高光伏电池的能量转换效率。上述研究成果都证实了光子晶体对热辐射的控制作用及其应用于热红外隐身的可能性。由于热红外隐身技术尚需考虑多波段兼容等诸多因素,难度较大,与能量转换领域的研究相比,将光子晶体应用于热红外隐身的报道目前较少,尚处于起步阶段。

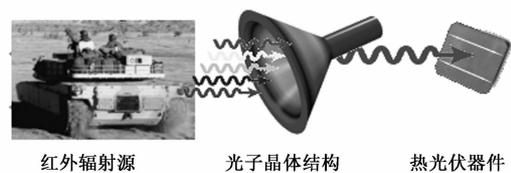


图1 利用光子晶体结构抑制热红外信号的原理示意图

#### 3.2 光子晶体应用于多波段宽频隐身

多波段宽频隐身是隐身技术发展的趋势,但通常各波段对材料的光谱选择性有不同的要求,甚至是相互冲突的。为了解决这些冲突,必须找到光谱选择性容易控制的材料。作为一种光谱选择性可通过微结构的周期性进行调节的材料,光子晶体概念的提出和发展为多波段宽频隐身的实现提供了新的途径。

##### 3.2.1 红外与电磁波隐身兼容

目前常用的低发射率红外涂料主要是通过涂在涂料中掺杂金属粉末来提高材料的表面反射率,其红外伪装性能不稳定,容易出现表面泛白现象,而且隔热能力差,难以满足雷达波段的兼容性要求。根据基尔霍夫定律,材料的发射率等于其的吸收率,因此,红外透明材料就是红外低发射率材料,原则可用于热红外隐身。但是,通常红外透明材料的折射系数并不大,表面反射率不高,不能有效阻断来自目标的红外辐射,所以红外透明材料不能直接用于红外伪装。如何在保持红外透明材料的低红外吸收特性的基础上增大其反射性,就成为红外隐身材料研制的关键。作为一种新型人工结构功能材料,光子晶体的重要特性之一就是对其禁带频率的光波可产生高反射特性。原则上,即使组成光子晶体的两种材料都是红外透明的,由于禁带的存在,其周期性微结构也会对某些红外波段的光产生高反射。根据该原

理,可以设计由红外光学透明介质组成的光子晶体,使光子晶体的禁带位于探测器敏感的红外波段,如 3~5 μm 或 8~12 μm,这样就可以在保持红外透明介质本身的低吸收特性的同时,利用光子晶体结构对禁带光波的高反射特性有效阻隔来自目标的红外辐射信号,实现红外与电磁波隐身兼容。“光子晶体”概念的创始人之一 Eli Yablonovitch 在美军研究室(U. S. Army Research Office)的支持下,以表面反射能力不高的红外透明材料硫化物玻璃为介质制备了反蛋白石结构的三维光子晶体<sup>[4]</sup>,这些硫化物光子晶体对 3~5 μm 和 8~12 μm 红外辐射反射率高达 90% 以上,可有效降低目标的红外辐射信号。由于硫化物玻璃在电磁波段是透明的,这种光子晶体低发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通过调节反 opal 的周期进行灵活调控,具有传统的低发射率涂料无法比拟的优点。

### 3.2.2 宽频隐身

利用光子晶体结构还可以实现宽频隐身。BeO 介质在 3~5 μm 波段高反,但对 8~12 μm 波段红外辐射是透明的。瑞典国防研究机构在 2004~2005 年的一项研究中,制备了禁带覆盖 8~12 μm 波段的 BeO 三维结构光子晶体,利用其对禁带 8~12 μm 热红外波段的高反射特性,同时实现了对 3~5 μm 及 8~12 μm 波段红外的宽频抑制(如图 2 所示),拓宽了 BeO 红外隐身的频率范围,凸现了光子晶体结构的优势。

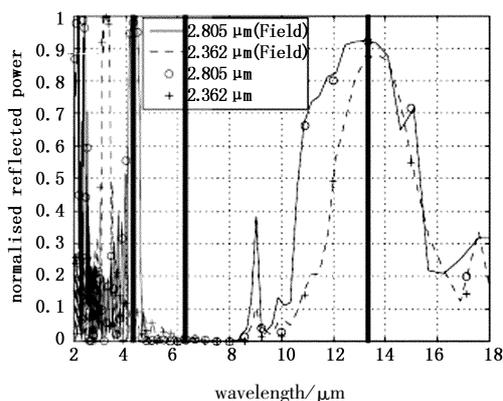


图 2 BeO 光子晶体的反射光谱图

### 3.3 光子晶体应用于自适应隐身

自适应隐身技术是未来机动作战对武器装备的智能化伪装要求和发展趋势,国外对基于变发射率材料的自适应伪装技术的研究已有数十年的时间。变发射率材料是一种能够在外部激励(如电场、光、

热等)作用下,发射率能够循环改变的材料。但单纯的变发射率材料的光谱选择性及其发射率可调节的范围有限。加拿大的研究人员<sup>[5]</sup>研制了一种基于 WO<sub>3</sub> 反 opal 结构光子晶体的电致变色器件(如图 3、图 4 所示),通过将光子晶体结构的禁带特性与 WO<sub>3</sub> 介质的电致变色特性相结合,使器件在可见光波段的反射光谱和发射率可以通过电压在一定范围内调节,增大了 WO<sub>3</sub> 介质的光谱选择性的调节范围和调节幅度,未来在自适应迷彩伪装技术方面具有很好的应用前景。

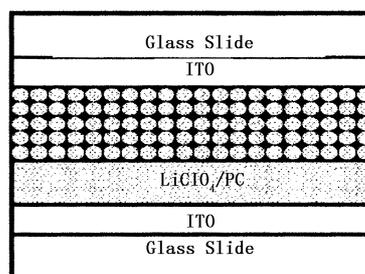


图 3 基于 WO<sub>3</sub> 反 opal 光子晶体的电致变色器件

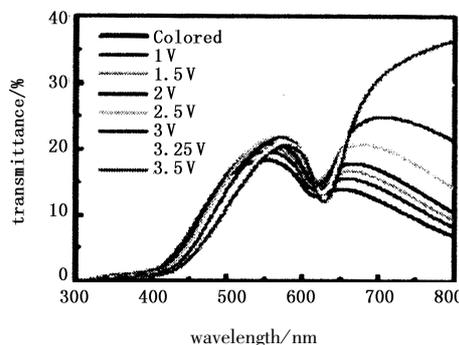


图 4 电致变色器件在不同电压下的透射光谱图

### 3.4 光子晶体应用于“光学波段隐身斗篷(cloak)”

隐身 cloak 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。通常情况下,雷达或肉眼等之所以能够对物体成像,主要是利用了物体的反射电磁波,所以如果有一种材料涂覆或包裹在物体表面,能引导电磁波完全绕过物体,不产生反射,在观察者看来,物体就似乎变得“不存在”了,以此可以达到隐身的理想效果。利用电磁波的负折射现象引导电磁波绕射是实现隐身 cloak 的关键。目前,人们获得的具有负折射效应的介质都是人工材料,主要包括两类:①由共振环和金属丝形成的复合结构;②由周期性介质形成的光子晶体<sup>[6]</sup>。虽然光子晶体的单元尺寸在波长量级,所以不适合用等效介电常数和等效磁导率来描述光子晶体的负折射性质。然而,某些光子晶体中的衍射可以激发相速度和群速度方向相反的波。利用光子晶

体的负折射效应能使发生负折射的电磁波频段从微波段扩展到光波段,因此,近年来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<sup>[7]</sup>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  $\mu\text{m}$  波长左右的负折射现象。香港科技大学的陈子亭等报道,使用正方阵列的纳米银线作为二维光子晶体,实现了近红外区的负折射。2008 年 6 月,美国的一个研究小组提出利用一组同轴的硅光子晶体环<sup>[8]</sup>,有可能接近实现“光学隐身斗篷”的特殊功能。伴随着光子晶体制备技术的发展,三维亚微米尺度的光子晶体结构的制备已日渐成熟,因此光子晶体比左手材料有望成为突破红外和光学频率隐身 cloak 的重要手段。

#### 4 结论与展望

光子晶体结构在实现高温目标的红外抑制、多波段宽频隐身等方面具有明显的特色和优势,目前该方面的研究已经进入到应用原理的实验验证阶段;具有负折射效应的光子晶体结构的研究虽然处于理论和实验探索的初期,但由于实现“光学波段隐身 Cloak”的诱人前景,如何设计、构造具有负折射效应的光子晶体结构并进行验证是目前国内外研究的热点和发展趋势。综合分析国内外光子晶体在隐身领域的研究现状,仍存在应用原理的实验验证不足,缺乏光子晶体基本物理现象和机制(负折射效应等)的深入理解等。相信随着光子晶体理论研

究的不断深入和制备技术的不断完善,利用光子晶体独特的控制电磁波传播特性,突破传统隐身概念和途径的新型隐身材料和技术将会在未来军事对抗中发挥重要作用。

#### 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. Localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2486 - 2489.
- [3] Lin S Y, Moreno J, Fleming J G. Three-dimensional photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic power generation[J]. Applied physics letters, 2003, 83(2):380.
- [4] Aliev A E, Zakhidov A A, Baughman R H, et al. Chalcogenide inverted opal photonic crystal as infrared pigments [J]. International Journal of Nanoscience, 2006, 5(1): 157 - 172.
- [5] P V Ashrit, Su-Lan Kuai. Fabrication of Electrochromically tunable photonic crystals [J]. Proc. of SPIE, 2006, 6322, 632202. 1 - 632202. 9.
- [6] 李志远, 张道中. 光子晶体和负折射介质材料 [J]. 中国基础科学, 2005, 6:7.
- [7] Berrier A, Mulot M, Swillo M, et al. Negative refraction at infrared wavelengths in a two-dimensional photonic crystal [J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93:037902.
- [8] Xiao D, Johnson H T. Approximate optical cloaking in an anisymmetric silicon photonic crystal structure [J]. Optics Letters, 2008, 33(8):860 - 862.