

Application and Development of Photonic Crystals in Infrared Stealth

Hao Wang^{1*}, Zhongze Yang², Kexin Liu¹, Luhui Yu¹, Yong Wan^{1#}

¹College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong

² Qingdao Weiming School, Southlands Schools International China, Qingdao Shandong

Email: #wanyongqd@hotmail.com

Received: Aug. 19th, 2019; accepted: Sep. 5th, 2019; published: Sep. 12th, 2019

Abstract

Photonic crystal is a new kind of material with periodic variation of medium with space. Its photonic bandgap can block the propagation of electromagnetic wave and plays a wide role in the application of infrared stealthy technology. In this paper, the role and development of photonic crystals in thermal infrared stealthy, wide band stealthy, infrared multi-band compatible stealthy and adaptive infrared stealthy are introduced. Based on the analysis of the research status of infrared stealthy applications of photonic crystals, some suggestions for its development are put forward.

Keywords

Photonic Crystal, Infrared Stealth, Photonic Bandgap, Atmospheric Window, Reflectivity

光子晶体在红外隐身中的应用及其发展历程

王皓^{1*}, 杨忠泽², 刘可歆¹, 于鲁辉¹, 万勇^{1#}

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛

²索斯兰国际学校青岛为明中学, 山东 青岛

Email: #wanyongqd@hotmail.com

收稿日期: 2019年8月19日; 录用日期: 2019年9月5日; 发布日期: 2019年9月12日

摘要

光子晶体是一种介质随空间周期性变化的新型材料, 其光子禁带可以阻断电磁波的传播, 在红外隐身技

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王皓, 杨忠泽, 刘可歆, 于鲁辉, 万勇. 光子晶体在红外隐身中的应用及其发展历程[J]. 材料科学, 2019, 9(9): 835-848. DOI: 10.12677/ms.2019.99104

术的应用中作用广泛。本文分别介绍了光子晶体在热红外隐身、宽频隐身、红外多波段兼容隐身、自适应红外隐身中的作用及其发展历程。并通过分析光子晶体红外隐身应用中的研究现状,对其的发展提出一些建议。

关键词

光子晶体, 红外隐身, 光子禁带, 大气窗口, 反射率

Copyright © 2019 by author(s) 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

红外探测技术主要通过目标的红外辐射特征发现和识别目标(其工作波段主要存在于 3~5 μm 和 8~14 μm)。随其发展,红外探测技术对战场上军事目标的威胁越来越严重,迫切需要新型红外隐身材料的出现。红外隐身材料是通过降低或改变目标的红外辐射特性,从而控制目标的红外辐射特征,实现对目标的低可探测性,最终使红外探测器无法探测或识别目标。光子晶体是一种很有前途的红外隐身材料,因为它能在一定的频率范围内阻止电磁波的传播。

2. 光子晶体的基本特性

光子晶体是一种介电常数随空间周期性变化的人工结构,它的概念是在 1987 年由贝尔通讯研究所的 Yablonovitch [1]和林斯顿大学的 John [2]分别独立提出的。

光子晶体最根本的特性是光子禁带,当电磁波在光子晶体中传播时,由于存在布拉格散射而受到调制,形成类似于电子的能带结构,即光子能带。在光子能带之间存在使某频率的电磁波完全不能通过的频率区域,即光子禁带或光子带隙。光子禁带的存在可以控制自发辐射,自发辐射的概率与光子此频率态的数目成正比,当光子晶体中光子的自发辐射光频率落在光子禁带中时,由于该频率光子态的数目为零,自发辐射几率为零,自发辐射会被完全抑制[3]。

光子晶体的另一个重要特性是光子局域。1987 年, John [2]提出在介电材料组成的超晶格(即光子晶体)中,如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷,光子禁带中会产生相应的缺陷能级,和缺陷态频率相吻合的光子可能被局限在缺陷区域,一旦其偏离缺陷处光子态数目就会迅速衰减,这个缺陷就称作光子局域。

光子晶体中还存在反常折射现象。美国的 Dowling [4]在 1994 年用一维 Kronig-Penney 模型得到一维光子晶体的色散关系,由此预测在一维光子晶体中存在着反常折射现象。近年来,科学家对光子晶体的反常折射现象展开了研究,实验中光在进入光子晶体发生折射时,折射光不是偏向于法线方向,而是偏向于界面方向,证明了光子晶体中反常折射现象的存在。

由于这些独特性质,使光子晶体可以在高温目标的热红外隐身、红外宽频隐身、红外多波段兼容隐身、自适应红外隐身中起到其他隐身材料难以达到的理想效果。本文将从这几个方面介绍光子晶体在红外隐身应用中的基本原理和研究进展。

3. 光子晶体应用于目标的热红外隐身

现代化战场上红外探测器的广泛使用使得红外隐身在隐身技术中愈加关键。红外探测器通过收集

目标的红外辐射来发现和识别目标，而目标的红外辐射强度主要取决于目标的热力学温度和表面发射率。目标的热力学温度主要跟其工作状态有关，很难人为改造，所以研究主要是通过降低目标的表面发射率来控制目标的红外辐射。一般红外探测主要针对于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段，这就要求红外隐身材料在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个红外波段具备高反射率、低透射率的性质。利用禁带位于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段的光子晶体可以有效减少红外探测器可探测到的辐射，并将辐射能量转变为不容易被探测到的波段的能量，由此来实现红外隐身。下文将分类介绍一维和三维光子晶体在热红外隐身中的应用进展。

1) 一维光子晶体在热红外隐身中的应用进展：一维光子晶体是一种层状结构，制备简单且性能优异，对红外辐射有良好的抑制作用。1997年，Djuric 等[5]基于详细的理论分析设计了具有供体和受体缺陷的一维硅(Si)/二氧化硅(SiO_2)光子晶体材料，该结构由6个 Si/ SiO_2 结构周期性排列构成，在 $3.5\sim 4.5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射透射率几乎为0。1998年，Fink 等[6]实现了一维光子晶体的全反射。这种一维光子晶体是由聚苯乙烯(C_8H_8)_n和碲(Te)交替构成的，而且这种材料可以通过设计改造得到不同波段的禁带，简单利用(C_8H_8)_n和 Te 交替的结构便可得到在 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 红外波段的全向反射镜。2001年，Temelkuran 等[7]利用聚乙烯(C_2H_4)_n和 Te 制备出全反射一维光子晶体，在 $4.5\sim 5.5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 红外大气窗口波段对任意偏振态实现了全反射，如图1所示。

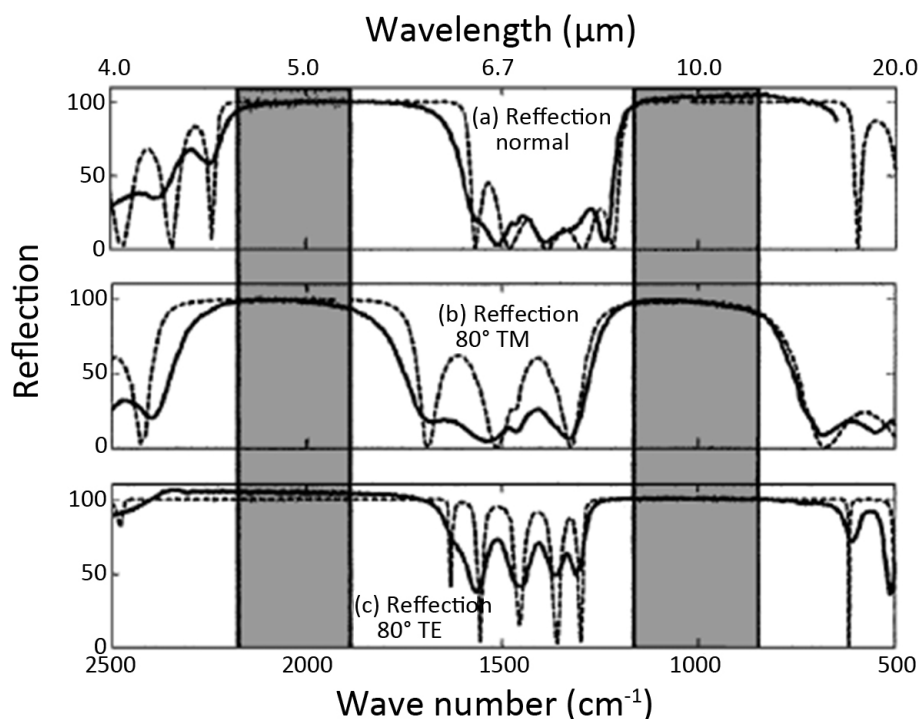


Figure 1. Calculation (dashed line) and measurement (solid line) reflectivity of one-dimensional photonic crystal samples (cited from the literature [7])

图 1. 一维光子晶体样品的计算(虚线)和测量(实线)反射率(引自文献[7])

2004年，Drupp 等[8]利用铝(Al)和聚酰亚胺基底制备出双波段红外单层金属介质光子晶体，在中远红外波段拥有优异的禁带效果。同年，Yu 等[9]使用金属材料银(Ag)和氟化镁(MgF_2)设计制备的一维金属电介质光子晶体，在可见光和红外波段的吸收性能得到了很大的提高，而且吸收率随着光子晶体的周期数增加而增大。2007年，Wang 等[10]将光子晶体结构引入到氧化处理的多孔硅中制备出一种具有良好隔

热性能的一维部分氧化多孔硅光子晶体结构, 其具有中心波长在 $3\ \mu\text{m}$ 波长处, 禁带宽度为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的光学带隙。2008 年, 刘必鏊等[11]利用硒化镉(CdSe)、 SiO_2 设计出的一维光子晶体, 在 $3.14\sim 5.57\ \mu\text{m}$ 和 $8.16\sim 13.96\ \mu\text{m}$ 的光谱反射率都大于 95%。2014 年, Zhang 等[12]采用锗(Ge)和硫化锌(ZnS)交替沉积成设计的一维异质结构光子晶体, 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段的平均辐射率为 0.046 和 0.190, 而在 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 波段的平均辐射率为 0.579, 具有明显的红外低发射率特性且具有一定的选择性。可见, 一维光子晶体在近十几年发展极其迅速, 技术已经非常成熟, 在红外隐身上的应用会愈加广泛。

2) 二维光子晶体在热红外隐身中的应用进展: 二维光子晶体在制备上虽然比一维光子晶体复杂, 但却比三维光子晶体简单很多, 而性能上的很多方面可以比拟三维光子晶体, 所以二维光子晶体在红外调制性能上比一维光子晶体更加优异, 但生产制备上又不会过于复杂。早在 1999 年, 红外探测器还没有在战场上得到广泛使用时, Rowson 等[13]就对二维光子晶体中红外波段反射特性的影响因素进行了研究, 并利用大孔径硅设计制备出一种二维三角晶格光子晶体(如图 2), 并且在中红外波段拥有高反射率。

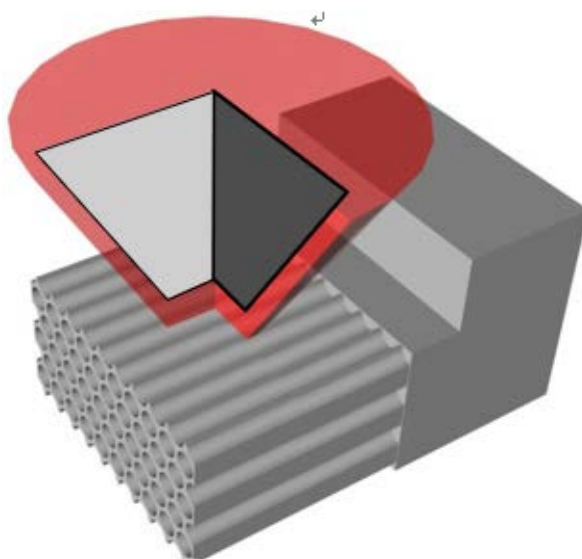


Figure 2. Schematic diagram of two-dimensional triangular lattice photonic crystal (cited from the literature [13])

图 2. 二维三角晶格光子晶体示意图(引自文献[13])

2004 年, Kuriki 等[14]对聚醚砜树脂(PES)和三硒化二砷(As_2Se_3)使用气相沉积法制备出中空多层光子晶体纤维。实验发现单根直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的纤维在 $3\sim 3.7\ \mu\text{m}$ 波段的反射率接近 100%, 而单根直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的纤维在 $1.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段的反射率接近 100%。

3) 三维光子晶体在热红外隐身中的应用进展: 虽然一维、二维光子晶体制备相对简单且在红外隐身应用上技术愈加成熟, 但三维光子晶体才是未来光子晶体红外隐身技术的核心材料, 其三维结构对任意方向入射的电磁波都能实现理想调制。早在 1991 年, Yablonovich [15]就在实验室中设计制备出一种三维光子晶体。1998 年, Lin 等[16]先将高折射率多晶硅进行激光刻蚀制成栅栏状, 再将其层层堆积制备成木堆结构光子晶体, 它在 $10\sim 14.5\ \mu\text{m}$ 波段拥有一条很宽的光子禁带, 当光多个角度入射时, 其反射率均可以达到 90%。2000 年, Lin 等[17]先在 Si 基板上放置一片三维光子晶体薄片得到实验所需的样品, 然后对样品进行液氮制冷(77K), 再让其升温至 410K, 最终使用红外光谱仪对样品进行实验测试。结果表明, 样本对 $10\sim 16\ \mu\text{m}$ 波段的热辐射有显著抑制, 同时加强了 $5\sim 9\ \mu\text{m}$ 波段的热辐射能量, 如图 3 所示。

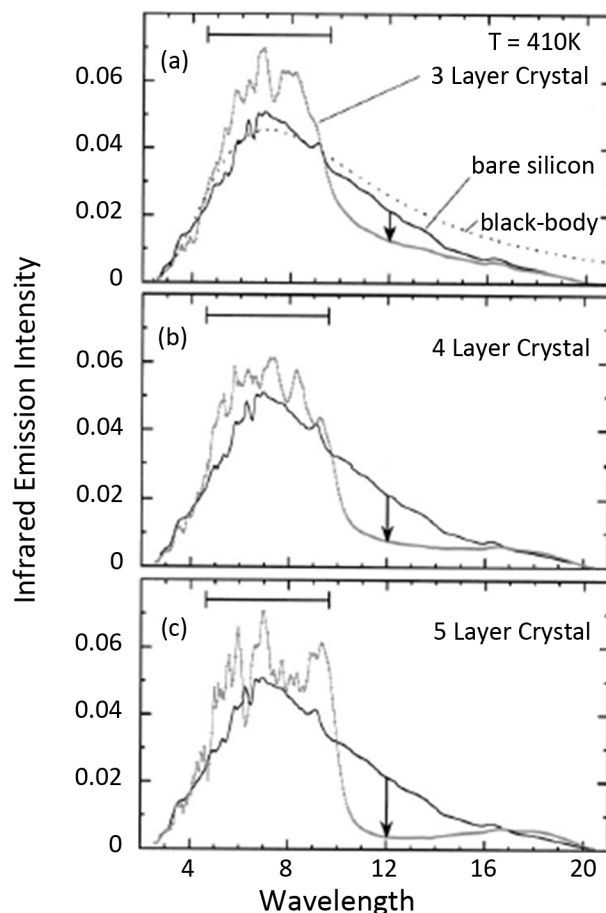


Figure 3. Thermal emission spectra of silicon and 3D photonic crystals with different layers (cited from the literature [17])

图 3. 不同层数的硅和三维光子晶体的热发射光谱(引自文献[17])

2002年, Fleming等[18]研究设计出新型宽带隙三维光子晶体,它能够理想的实现对远红外8~20 μm 波段的辐射抑制作用。2003年, Lin等[19]设计制备了木堆结构的金属W三维光子晶体。在其禁带波段3~10 μm 的热辐射特性会被显著抑制,而能带波段1.5~1.9 μm 的热辐射特性被显著增强。2005年, Enoch等[20]先用抛光硒化锌(ZnSe)做基底,利用气相沉积法和激光刻蚀法将金(Au)、ZnSe支撑栅栏片层状,在7~12 μm 红外波段表现出良好的热辐射控制性。2010年, Li等[21]先通过溶剂蒸发对流自组装法制备得到 SiO_2 胶体晶体,再采用低压化学气相沉积法填充Si,制备得到Si反蛋白石(opal)三维光子晶体。它具有明显的光学反射峰,表现出光子禁带的效应,在3.32 μm 处实现了全反射。2013年, Arpin等[22]以 SiO_2 为模板,通过原子层沉积W和化学气相沉积硼化铪(HfB_2)制备出的三维金属光子晶体,可以有效抑制2~5 μm 波段的红外辐射。2017年,张连超等[23]通过优化的垂直沉积法,将微米级 SiO_2 胶体微球自组装成高质量的蛋白石型光子晶体结构。其光子禁带中心波长分别为3.2 μm 和9.0 μm ,禁带宽度分别为0.7 μm 和1.9 μm ,较好的满足了红外隐身的要求。

4. 光子晶体应用于红外宽频隐身

对于红外隐身而言,实现红外波段的宽频隐身,可有效降低目标的红外可探测性。因此,拓宽红外禁带宽度是红外隐身的一个重点,也是光子晶体在红外隐身应用中的一个重点。影响光子晶体带宽主要

有三个因素：光子晶体的空间结构分布、介电常数比值、光子晶体的几何结构。因此现在拓展带宽的方法主要是在光子晶体中引入新的材料(超导体、等离子体、无序成分等)和改变其周期性结构两种。

2002年, Wang 等[24]通过将两个不同禁带的一维光子晶体叠加在一起实现了两个光子晶体禁带的合并拓宽, 如图 4 所示。

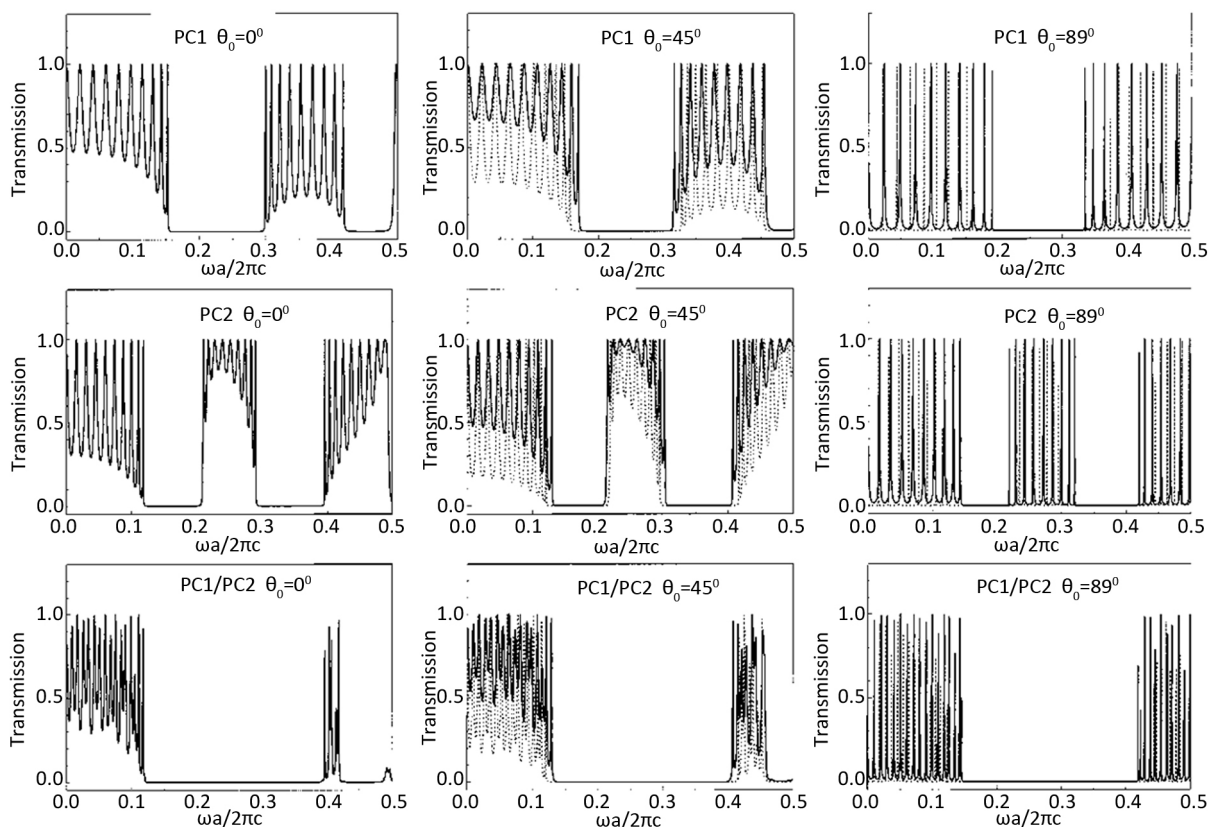


Figure 4. The spectrum of the photonic crystal after the superposition (cited from the literature [24])

图 4. 叠加后的光子晶体拓宽光谱图(引自文献[24])

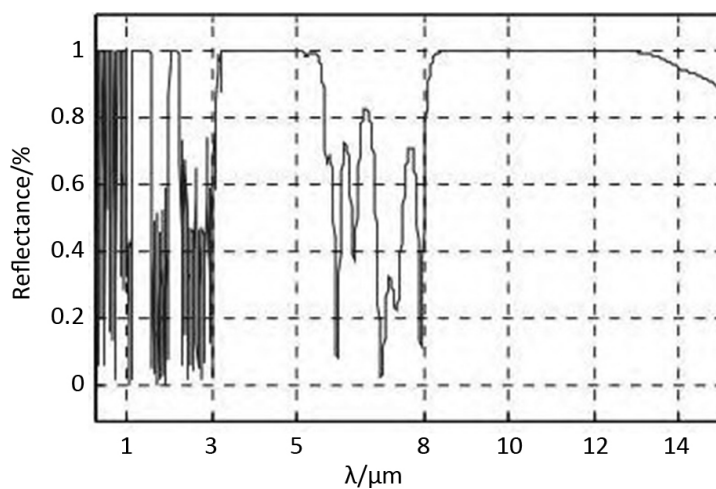


Figure 5. Reflection patterns of double-period heterostructure photonic crystals (cited from the literature [25])

图 5. 双周期异质结构光子晶体反射图谱(引自文献[25])

2008年,赵大鹏等[25]利用异质结构法将Te和 $(C_2H_4)_n$ 材料制备成了中远红外双波段全向反射镜(一维光子晶体),它在 $3.4\sim 5.3\ \mu\text{m}$ 和 $7.9\sim 12.2\ \mu\text{m}$ 波段实现了对任意偏振态的全反射。并通过改进材料的填充比,将其全向反射的波段拓展为 $3.4\sim 5.4\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12.5\ \mu\text{m}$,如图5所示。

2011年,Kong等[26]通过在一维新型三元光子晶体结构中引入等离子体,实现禁带的拓宽。

2012年,Zhao等[27]先选用碲化铅(PbTe)和 MgF_2 分别制备了中心波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 、 $4.8\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $1.06\ \mu\text{m}$ 的一维光子晶体,后将四种光子晶体复合制备出了新的光子晶体,它在 $1\sim 18\ \mu\text{m}$ 波段获得了近100%的反射率,很好地满足了全红外波段隐身的要求。

同年,Hung等[28]通过在光子晶体中添加金属层或构建异质结构拓宽了光子晶体的红外禁带,它通过在Si/SiO₂周期性排列的一维二元光子晶体中掺杂15 nm的Al金属层(其中Si的折射率由Si的掺杂浓度来控制),或通过层叠两种或更多的普通二元光子晶体结构构建异质结构,从而得到极宽的光子禁带,图6为50个周期的三种不同厚度比的Si/SiO₂异质结构光子晶体的反射光谱图。

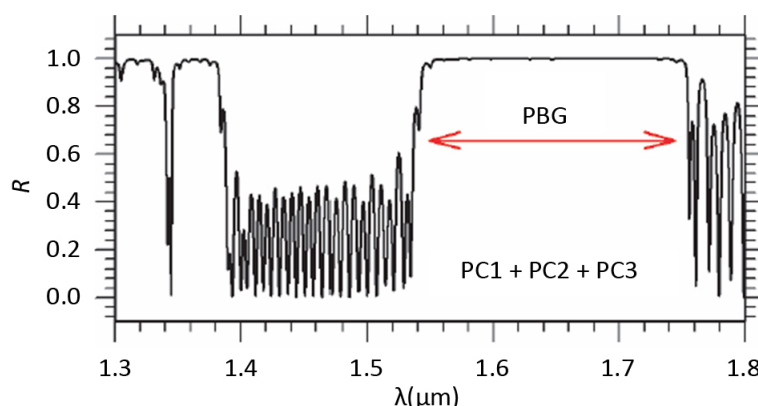


Figure 6. Reflection spectral diagram of hetero-structure photonic crystal (cited from the literature [28])

图6. 异质结构光子晶体反射光谱图(引自文献[28])

2016年,张继魁等[29]设计出一种具有“光谱挖空”特性的一维光子晶体。它基于薄膜的传输矩阵法和异质结构理论,拓展了光子晶体的禁带宽度,使之覆盖近中红外波段;随后,利用掺杂原理,在光子晶体周期结构中引入了两种缺陷。结果显示,在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的带隙中出现了波长分别为 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.54\ \mu\text{m}$ 的缺陷模,反射率分别为1.21%和1.79%,实现了近中红外与 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.54\ \mu\text{m}$ 激光兼容隐身。2018年,Amri等[30]设计出Si/六甲基二甲硅醚(HMDSO)交替层的无机/有机一维光子晶体(如图7所示)。采用射频磁控溅射法制备无机硅,用PECVD技术沉积有机HMDSO。在 $1.08\sim 1.99\ \mu\text{m}$ 红外波段内存在低发射率,禁带宽度可达 $0.91\ \mu\text{m}$,如图8所示。

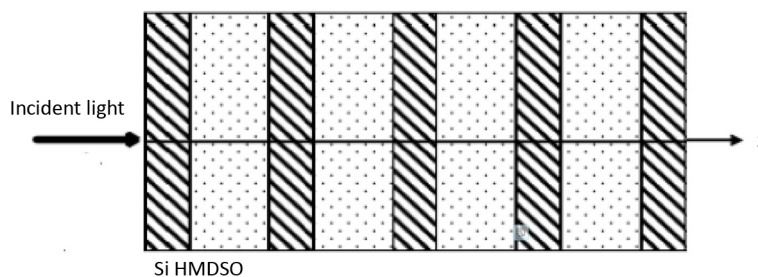


Figure 7. Schematic diagram of one-dimensional photonic crystal structure with alternate distribution of Si/HMDSO (cited from the literature [30])

图7. Si/HMDSO交替分布的一维光子晶体结构示意图(引自文献[30])

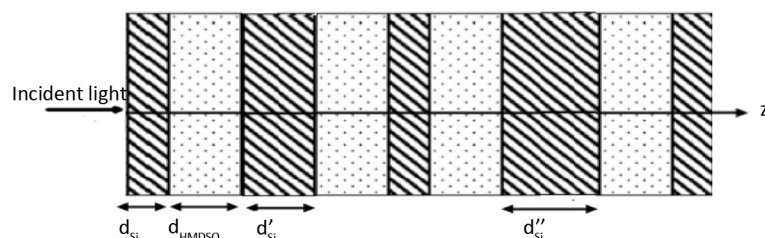


Figure 8. Schematic diagram of one-dimensional photonic crystal structure with double defects obtained by doping si layers with different thickness (cited from the literature [30])

图 8. 掺杂不同厚度的 Si 层后得到的具有双缺陷一维光子晶体结构示意图 (引自文献[30])

同年, Kang 等[31]设计了一种含石墨烯基双曲超材料(GHMM)的一维光子晶体, 其中红外波段具有较大的带宽和吸收率。

5. 光子晶体应用于红外兼容隐身

现代战场上雷达、激光、红外等先进探测器和精确制导武器的多样化发展, 对战场上人和武器的安全是一个严峻挑战, 因此战略性隐身不能仅限于单波段, 还要满足多波段兼容隐身的要求[32]。兼容隐身即多种功能性隐身之间的相互兼容, 它一般包括雷达隐身、红外隐身和激光隐身三种隐身的兼容。而现在的兼容隐身工艺主要是将具备单一隐身功能的传统型隐身材料或涂料相结合, 过程繁杂且具有局限性。而光子晶体作为一种光谱可以选择性控制的新型材料, 可以为兼容隐身提供一个新的途径。

5.1. 红外与激光兼容隐身

激光探测是一种主动探测, 通过探测己方发出的激光的回波来发现和识别目标的, 常用的军用激光器工作波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 。这就要求隐身材料在这两个波段具有高透射率低反射率。而红外隐身要求隐身材料在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段具有高反射率低透射率。这个矛盾使得红外隐身与激光隐身的兼容成为了一个难题, 而传统的隐身材料无法解决这一难题。不过光子晶体的出现有望解决这一难题。其光子带隙特性可以实现红外的高反射率, 而光子局域特性可以实现激光波长的低反射率, 如果在光子晶体红外波段高反射率的基础上进行“光谱挖空”, 便能使其在 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 两个波长处实现低反射率。

2007 年, 高海潮等[33]通过调控光子晶体的周期数、介质层厚度、掺杂层位置和厚度对一维掺杂光子晶体实现了“光谱挖空”。使光子晶体应用于激光与红外兼容隐身成为了现实。2009 年, 刘必鏊等[34]设计的掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体能够很好的满足热红外与 $1.06\ \mu\text{m}$ 或 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光隐身兼容的要求。2010 年, 高永芳等[35]通过“光谱挖孔”设计的一维掺杂光子晶体, 在 $10.6\ \mu\text{m}$ 处反射率几乎为 0, 在远红外波段反射率接近 1, 可良好的实现远红外和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的兼容隐身。2011 年, Zhao 等[36]将 PbTe 和六氟铝酸钠(Na₃AlF₆)材料交替镀膜制备出的周期双异质结一维光子晶体, 在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段的反射率高达 99%以上, 并且在 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光波长的透过率可达 96%以上, 如图 9 所示。

2012 年, 高永芳等[37]通过“光谱挖空”设计出的一维掺杂光子晶体, 可实现远红外和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的兼容隐身。2016 年, Wang 等[38]将 Si 引入交替排布的 Ge/ZnSe 薄膜中, 取代其中某一层 Ge 作为缺陷层, 成功制备出一种基于一维光子晶体的缺陷模式的涂层, 在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 中远红外波段具有高反射率, 并在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波段具有高透射率, 实现了中远红外与 CO₂ 激光的兼容隐身, 如图 10 所示。

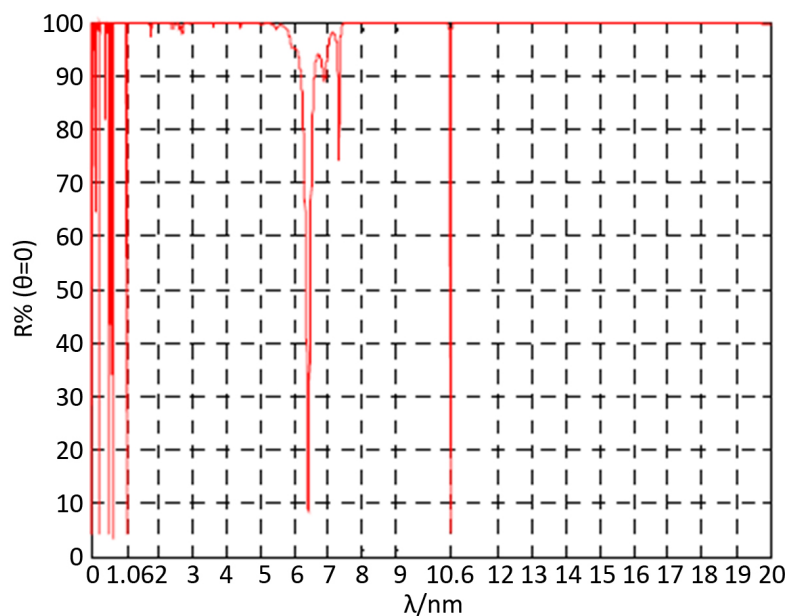


Figure 9. Reflectivity spectral diagram of one-dimensional photonic crystal with multi-period double heterostructure (cited from the literature [36])

图 9. 多周期双异质结构一维光子晶体反射率光谱图(引自文献[36])

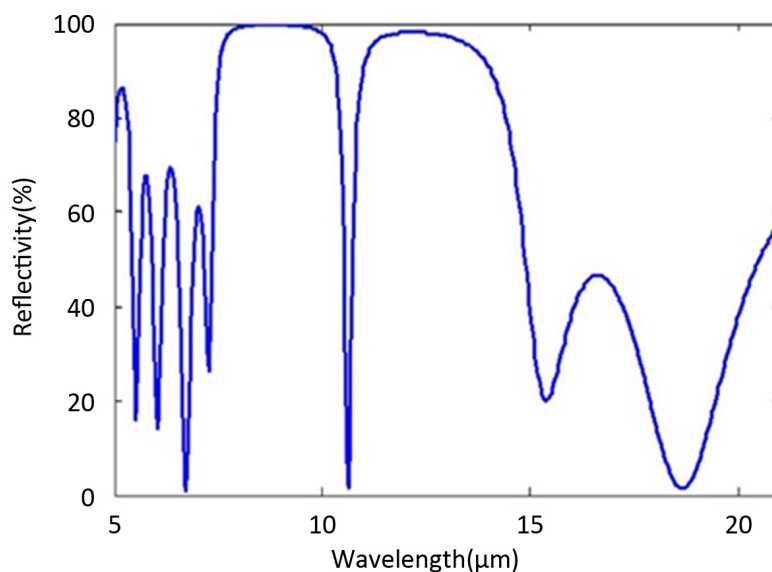


Figure 10. Reflection spectra of one-dimensional photonic crystals (cited from the literature [38])

图 10. 一维光子晶体的反射光谱(引自文献[38])

同年, Chao 等[39]采用真空镀膜的方法, 在硬质 Si 和柔性塑料基片上制备了光子晶体薄膜。设计了适用于远红外和激光兼容伪装的光子晶体薄膜, 并利用薄膜光学理论, 采用特征矩阵法计算了它们的反射光谱。其在 8~14 μm 中远红外波段都能很好地达到红外与激光的兼容隐身。同年, Miao 等[40]在硅片上交替沉积 Te、ZnSe 和 Si 材料制备出的掺杂光子晶体, 在 10.6 μm 激光波长处反射率为 28.0%, 而在 3~5 μm 、5~8 μm 、8~14 μm 波段的平均自发辐射率分别为 8.5%、45.0%、28.1%, 在兼容红外和激光隐身应用方面表现出了显著的优势。

5.2. 红外与雷达兼容隐身

雷达探测通过发射电磁波对目标进行照射并接收其回波，由此来发现和识别目标。因此雷达隐身技术的关键就是要求隐身材料对入射的雷达波低反射、强吸收，即需要隐身材料具有低反射率，高透射率。这与需要高反射率的红外隐身材料产生了矛盾。目前实现雷达与红外兼容隐身的主要方法是将两种隐身材料相互叠加，而这种方法有很大的局限性[41]。而光谱可以选择性调控的光子晶体就有望解决这一难题。2014年，Wang等[42]设计了由Ge/ZnS交替组成的4个介质层厚度不同的异质结构的光子晶体，制备出一维双异质结构材料，实现了在3~5 μm 和8~14 μm 的极高反射率，如图11所示。并且这种材料与微波吸收材料组合时，在雷达波段存在高透射性，可以实现红外-雷达兼容隐身，如图12所示。

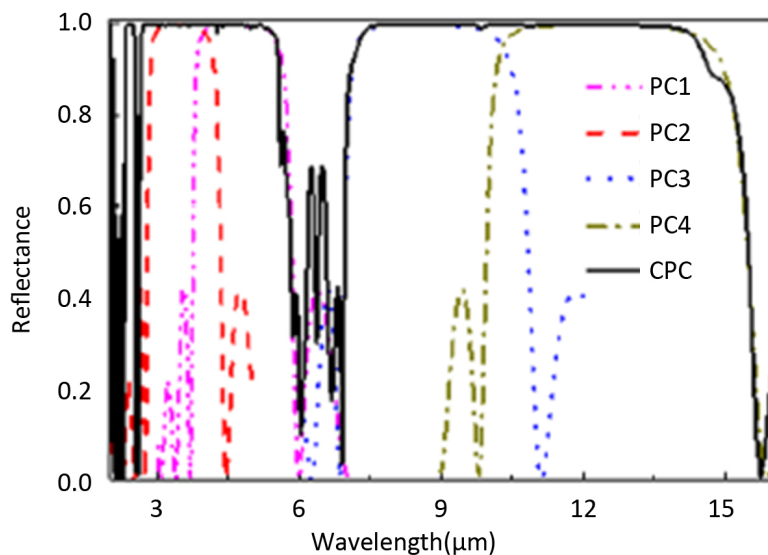


Figure 11. Reflection spectra of double heterostructures (cited from the literature [42])

图 11. 双异质结构的反射光谱图(引自文献[42])

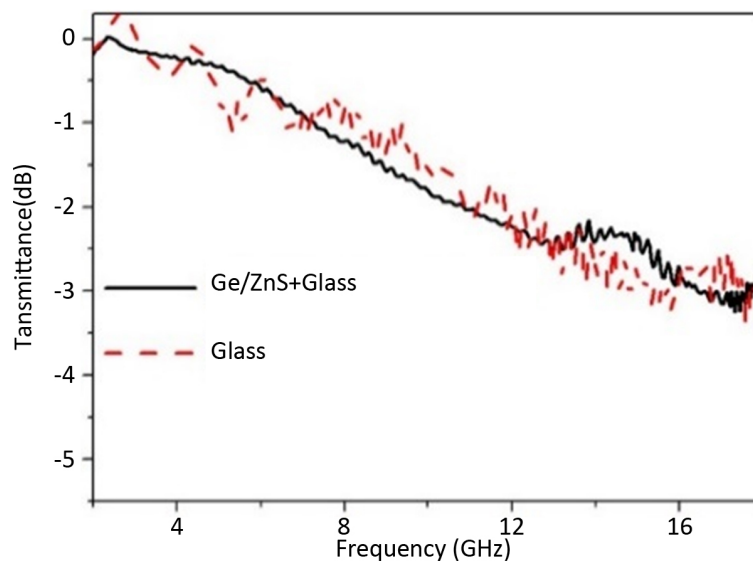


Figure 12. Transmission spectrum of photonic crystals in radar band (cited from the literature [42])

图 12. 光子晶体在雷达波段的透射光谱图(引自文献[42])

2017年, Zhang等[43]利用 Ge、ZnSe 和 Si 制备的一维光子晶体, 实现了 8~14 μm 波段和 10.6 μm 激光波长的兼容隐身; 然后将其与雷达吸波材料(Ram)相结合, 制成一种多波段隐身材料, 可实现 8~14 μm 红外波段、10.6 μm 激光波长和雷达波段的兼容隐身。

6. 光子晶体应用于自适应红外隐身

自适应红外隐身技术又称智能红外隐身技术, 是指通过一定的技术方法, 使被探测目标的红外辐射特性能够随环境的红外辐射特性自动发生相应调整, 实现目标与环境红外辐射特性的统一, 消除目标与背景的红外探测特性差异, 从而得以伪装掩护和隐身, 其最大的优势是能随环境的变化自动做出相应调整[44]。

常规的自适应红外隐身技术主要包含变温型和变发射率型两种。而单纯的变温材料和变发射率材料也无法达到理想的自适应隐身效果。如果将变发射率材料和光子晶体相结合, 就可能获得灵敏度高, 调制范围大的变发射率自适应红外隐身材料。因此, 光子晶体在自适应红外隐身上的应用也不容小觑。

2004年, Larsson等[45]采用直流磁控溅射法制备了用于红外发射率调制的全薄膜电致变色器件。该器件以三氧化钨(WO_3)为主电致变色层, 二氧化锆(ZrO_2)作为离子导体, $\text{NiV}_x\text{O}_y\text{H}_z$ 作为补充电致变色层, 基底为 ITO 玻璃, 通过施加电压来实现红外发射率的调制。

2006年, Ashrit等[46]研制了一种基于 WO_3 反蛋白石结构光子晶体的电致变色器件(如图 13 所示)。通过将光子晶体结构的禁带特性 WO_3 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, 在以往的基础上增大了 WO_3 介质的光谱选择性调节范围和调节幅度, 如图 14 所示。

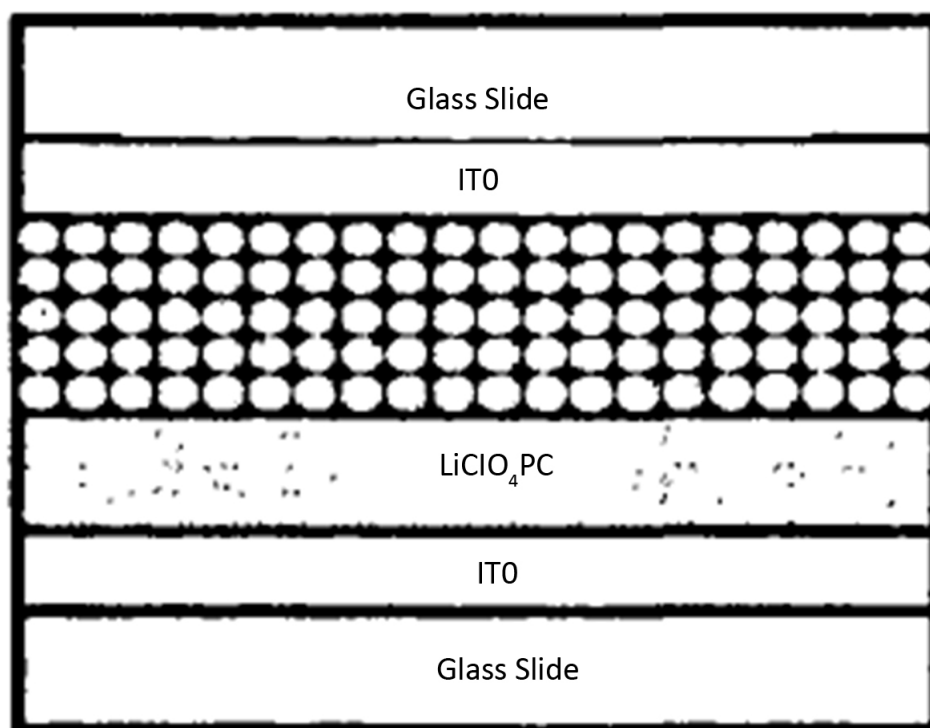


Figure 13. Electrochromic device based on WO_3 anti-opal photonic crystal (cited from the literature [46])

图 13. 基于 WO_3 反 opal 光子晶体的电致变色器件(引自文献[46])

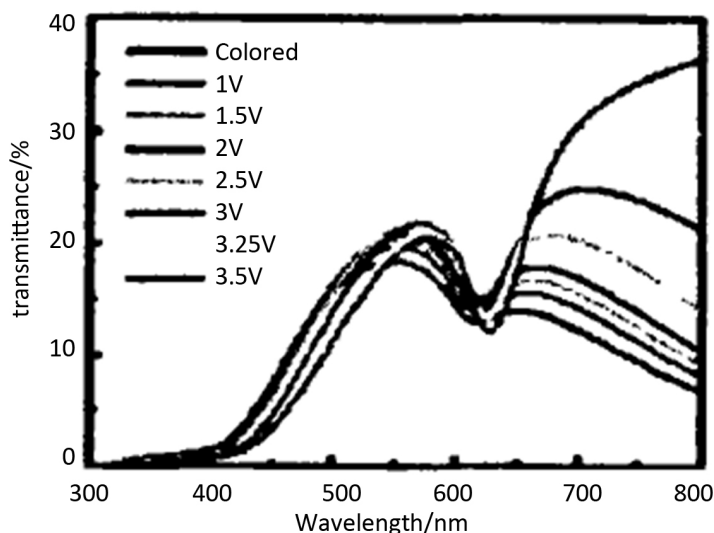


Figure 14. Transmission spectra of electrochromic devices under different voltages (cited from the literature [46])

图 14. 电致变色器件在不同电压下的透射光谱图(引自文献[46])

2008年, Puzzo等[47]设计出一种反射率受电场调制的聚合物膜材料。它是通过将具有电活性的聚合物填充于 SiO_2 光子晶体模板中, 然后再用HF去除模板, 并将膜联结在ITO膜上得到的。未来可能应用于自适应隐身中。2013年, Long等[48]从鱿鱼中发现的自组装结构中汲取灵感, 研究了可调制的仿生伪装涂层。他们先从鱿鱼皮肤中提取处含有反光蛋白质的血小板, 用它为原材料来制备光子晶体结构, 通过醋酸溶液的刺激, 引起血小板的厚度和间距变化, 从而能够使皮肤反射不同的光线。为自适应隐身提供了依据。2015年, Chernow等[49]用八面体晶胞单元的聚合物纳米晶格制备了禁带可调制的三维光子晶体, 其光谱特性可在近红外和中红外波段进行大范围调节。

7. 总结与展望

本文先介绍了光子晶体的基本性质, 包括光子带隙特性, 光子局域特性和光子晶体的负折射现象。然后分别介绍了光子晶体在热红外隐身、红外宽频隐身、红外兼容隐身和自适应隐身中的应用与进展。其中一维光子晶体和三维光子晶体研究颇多, 并且一维光子晶体研究趋于成熟, 但其对电磁波的调制范围有限, 限制了在红外隐身中的应用; 而三维光子晶体可通过使用不同的结构、材料、工艺来控制其对电磁波的调制效果, 并且已取得不错的进步, 在红外隐身上的应用将指日可待。

现在光子晶体技术已经可以完美实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个红外波段的高反射, 然后通过“光谱挖空”可以实现 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 两个激光波长处的高透射, 就可实现红外与激光隐身的兼容。在这些基础上可以通过光子晶体的调制使光子晶体在雷达波段存在高透射率, 这样就完成了多种隐身的兼容。而在自适应红外隐身方面, 光子晶体可以通过它自身的调制特性来实现, 并且已经取得了部分成果。

虽然光子晶体在红外隐身还没有广泛的应用。但因其特殊的性能, 必然是未来红外隐身技术中不可缺少的重要部分。对于光子晶体的研究, 特别是三维光子晶体, 需要加以重视, 相信光子晶体在未来隐身研究中将发挥重要作用。

参考文献

- [1] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>

- [2] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [3] 许静, 杜盼盼, 李宇杰. 光子晶体在隐身技术领域的应用研究进展[J]. 激光与红外, 2009, 39(11): 1133-1136.
- [4] Dowling, J. and Bowden, C. (1994) Anomalous Index of Refraction in Photonic Bandgap Materials. *International Journal of Optics*, **41**, 345-351. <https://doi.org/10.1080/09500349414550371>
- [5] Djuric, Z., Petrovic, R., Randelovic, D., et al. (1997) One Dimensional Si-SiO₂ Photonic Crystal with Defects Intended for Use in Infrared Spectral Region. *International Conference on Microelectronics*, Yugoslavia, 14-17 September 1997.
- [6] Fink, Y., Winn, J.N., Fan, S., et al. (1998) A Dielectric Omnidirectional Reflector. *Science*, **282**, 1679-1682. <https://doi.org/10.1126/science.282.5394.1679>
- [7] Temelkuran, B., Thomas, E.L., Joannopoulos, J.D., et al. (2001) Low-Loss Infrared Dielectric Material System for Broadband Dual-Range Omnidirectional Reflectivity. *Optics Letters*, **26**, 1370-1372. <https://doi.org/10.1364/OL.26.001370>
- [8] Drupp, R.P., Bossard, J.A., Ye, Y.H., et al. (2004) Dual-Band Infrared Single-Layer Metallodielectric Photonic Crystals. *Applied Physics Letters*, **85**, 1835-1837. <https://doi.org/10.1063/1.1786663>
- [9] Yu, J., Shen, Y., Liu, X., et al. (2004) Absorption in One-Dimensional Metallic-Dielectric Photonic Crystals. *Journal of Physics Condensed Matter*, **16**, L51. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/7/L01>
- [10] Wang, Z., Jie, Z., Xu, S., et al. (2007) 1D Partially Oxidized Porous Silicon Photonic Crystal Reflector for Mid-Infrared Application. *Journal of Physics D Applied Physics*, **40**, 4482. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/15/016>
- [11] Liu, B.L., Shi, J.M., Zhao, D.P., et al. (2008) A Kind of Infrared Camouflage Material Based on Photonic Crystals. *Infrared Technology*, **30**, 512-515.
- [12] Zhang, W., Xu, G., Zhang, J., et al. (2014) Infrared Spectrally Selective Low Emissivity from Ge/ZnS One-Dimensional Heterostructure Photonic Crystal. *Optical Materials*, **37**, 343-346. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.06.023>
- [13] Rowson, S., Chelnokov, A., Cuisin, C., et al. (1999) Two-Dimensional Photonic Bandgap Reflectors for Free-Propagating Beams in the Mid-Infrared. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **1**, 483. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/1/4/312>
- [14] Ken, K., Ofer, S., Shandon, H., et al. (2004) Hollow Multilayer Photonic Bandgap Fibers for NIR Applications. *Optics Express*, **12**, 1510-1517. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.001510>
- [15] Yablonovitch, E., Gmitter, T.J., Leung, K.M., et al. (1992) 3-Dimensional Photonic Band Structure. *Optical & Quantum Electronics*, **24**, S273-S283. <https://doi.org/10.1007/BF00625828>
- [16] Lin, S.-Y., Fleming, J., Hetherington, D., et al. (1998) A Three-Dimensional Photonic Crystal Operating at Infrared Wavelengths. *Nature*, **394**, 251. <https://doi.org/10.1038/28343>
- [17] Lin, S.Y., Fleming, J.G., Chow, E., et al. (2000) Enhancement and Suppression of Thermal Emission by a Three-Dimensional Photonic Crystal. *Physical Review B*, **62**, R2243-R2246. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.R2243>
- [18] Fleming, J.G., Lin, S.Y., El-Kady, I., et al. (2002) All-Metallic Three-Dimensional Photonic Crystals with a Large Infrared Bandgap. *Nature*, **417**, 52-55. <https://doi.org/10.1038/417052a>
- [19] Lin, S.Y., Moreno, J. and Fleming, J.G. (2003) Three-Dimensional Photonic-Crystal Emitter for Thermal Photovoltaic Power Generation. *Applied Physics Letters*, **83**, 380-382. <https://doi.org/10.1063/1.1592614>
- [20] Enoch, S., Simon, J.J., Escoubas, L., et al. (2005) Simple Layer-by-Layer Photonic Crystal for the Control of Thermal Emission. *Applied Physics Letters*, **86**, 681. <https://doi.org/10.1063/1.1954881>
- [21] Li, Y.-J., Xie, K., Xu, J., et al. (2010) Fabrication of Silicon Inverse Opal Photonic Crystal with a Complete Photonic Band Gap in Mid Infrared Range and Its Optical Properties.
- [22] Arpin, K.A., Losego, M.D., Cloud, A.N., et al. (2013) Three-Dimensional Self-Assembled Photonic Crystals with High Temperature Stability for Thermal Emission Modification. *Nature Communications*, **4**, 2630. <https://doi.org/10.1038/ncomms3630>
- [23] 张连超, 邱丽莉, 芦薇, 等. 蛋白石型光子晶体红外隐身材料的制备[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 134-140.
- [24] Xin, W., Hu, X., Li, Y., et al. (2002) Enlargement of Omnidirectional Total Reflection Frequency Range in One-Dimensional Photonic Crystals by Using Photonic Heterostructures. *Applied Physics Letters*, **80**, 4291-4293. <https://doi.org/10.1063/1.1484547>
- [25] 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): 454-457.
- [26] Kong, X., Liu, S., Zhang, H., et al. (2011) Omnidirectional Photonic Band Gap of One-Dimensional Ternary Plasma

- Photonic Crystals. *Journal of Optics*, **13**, Article ID: 035101. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/3/035101>
- [27] Jian, G.Z., Xuan, K.Z., Lian, F.W., *et al.* (2012) Forbidden Band Broadening of Photonic Crystal for Wide Waveband Infrared Stealth. *Advanced Materials Research*, **571**, 170-174. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.571.170>
- [28] Hung, H.-C., Wu, C.-J., Yang, T.-J., *et al.* (2012) Enhancement of Near-Infrared Photonic Band Gap in a Doped Semiconductor Photonic Crystal. *Progress in Electromagnetics Research*, **125**, 219-235. <https://doi.org/10.2528/PIER12010311>
- [29] 张继魁, 时家明, 苗雷, 等. 近中红外与 1.06 μm 和 1.54 μm 激光兼容隐身光子晶体研究[J]. 发光学报, 2016, 37(9): 1130-1134.
- [30] Amri, R., Sahel, S., Gamra, D., *et al.* (2018) Photonic Band Gap and Defects Modes in Inorganic/Organic Photonic Crystal Based on Si and HMDSO Layers Deposited by Sputtering and PECVD. *Optical Materials*, **76**, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.12.041>
- [31] Kang, Y. and Liu, H. (2017) Wideband Absorption in One Dimensional Photonic Crystal with Graphene-Based Hyperbolic Meta-Materials. *Superlattices & Microstructures*, **114**, S0749603617328689. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.12.046>
- [32] 左翔, 赵选科, 王莲芬, 等. 光子晶体在兼容隐身中的应用概述[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(1): 141-143.
- [33] 高海潮, 戴松涛. 一种新型红外低目标特征材料[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(4): 671-674.
- [34] 刘必盛, 时家明, 赵大鹏, 等. 光子晶体隐身应用分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 42-45.
- [35] 高永芳, 时家明, 赵大鹏. 一维掺杂光子晶体用于远红外与激光兼容隐身分析[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 235-238.
- [36] Zhao, X., Zhao, Q. and Wang, L. (2011) Laser and Infrared Compatible Stealth from Near to Far Infrared Bands by Doped Photonic Crystal. *Procedia Engineering*, **15**, 1668-1672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.311>
- [37] 高永芳, 时家明, 赵大鹏, 等. 一种基于光子晶体的中远红外双波段兼容伪装材料[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 970-974.
- [38] Wang, Q., Wang, J., Zhao, D., *et al.* (2016) Investigation of Terahertz Waves Propagating through Far Infrared/CO₂ Laser Stealth-Compatible Coating Based on One-Dimensional Photonic Crystal. *Infrared Physics & Technology*, **79**, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.10.006>
- [39] Chao, W., Lei, W., Chen, Z.H., *et al.* (2016) Production of Flexible Photonic Crystal Films for Compatible Far Infrared and Laser-Band Camouflage by Vacuum Coating Method. *Journal of Russian Laser Research*, **37**, 308-312. <https://doi.org/10.1007/s10946-016-9577-5>
- [40] Lei, M., Shi, J., Wang, J., *et al.* (2016) Heterogeneous Doped One-Dimensional Photonic Crystal with Low Emissivity in Infrared Atmospheric Window. *Optical Engineering*, **55**, Article ID: 057101. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.5.057101>
- [41] 李君哲, 田浩, 刘海韬, 等. 一种基于超材料的雷达红外兼容隐身材料设计与验证[J]. 功能材料, 2017, 48(5): 5137-5143.
- [42] Wang, Z., Cheng, Y., Nie, Y., *et al.* (2014) Design and Realization of One-Dimensional Double Hetero-Structure Photonic Crystals for Infrared-Radar Stealth-Compatible Materials Applications. *Journal of Applied Physics*, **116**, Article ID: 054905. <https://doi.org/10.1063/1.4892088>
- [43] Zhang, J.K., Shi, J.M., Zhao, D.P., *et al.* (2017) Realization of Compatible Stealth Material for Infrared, Laser and Radar Based on One-Dimensional Doping-Structure Photonic Crystals. *Infrared Physics & Technology*, **85**, 62-65. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.05.018>
- [44] 李佩青, 田英, 曹嘉峰, 等. 自适应红外隐身技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(10): 5-8, 12.
- [45] Larsson, A.-L. and Niklasson, G.A. (2004) Infrared Emittance Modulation of All-Thin-Film Electrochromic Devices. *Materials Letters*, **58**, 2517-2520. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.03.023>
- [46] Ashrit, P.V. and Kuai, S.L. (2006) Fabrication of Electrochromically Tunable Photonic Crystals. *Proceedings of SPIE*, Volume 6322, Article ID: 632202. <https://doi.org/10.1117/12.680628>
- [47] Puzzo, D.P., Arsenault, A.C., Ian, M., *et al.* (2010) Electroactive Inverse Opal: A Single Material for All Colors. *Angewandte Chemie*, **48**, 943-947. <https://doi.org/10.1002/anie.200804391>
- [48] Long, P., Walkup, W.G., Ordinario, D.D., *et al.* (2013) Camouflage Coatings: Reconfigurable Infrared Camouflage Coatings from a Cephalopod Protein. *Advanced Materials*, **25**, 5621-5625. <https://doi.org/10.1002/adma.201370246>
- [49] Chernow, V.F., Alaeian, H., Dionne, J.A., *et al.* (2015) Polymer Lattices as Mechanically Tunable 3-Dimensional Photonic Crystals Operating in the Infrared. *Applied Physics Letters*, **107**, Article ID: 101905. <https://doi.org/10.1063/1.4930819>