

文章编号: 1672-8785(2019)07-0001-11

红外/雷达兼容隐身材料的研究现状与进展

汪心坤 赵 芳* 王建江

(陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 随着各种新型探测雷达、先进红外探测器和精确制导武器的相继问世, 红外/雷达兼容隐身材料已经成为了目前隐身技术研究的重点。综述了传统和新型红外/雷达兼容隐身材料的隐身原理和研究现状, 并对未来红外/雷达兼容隐身材料的发展方向进行了总结与展望。

关键词: 红外/雷达兼容隐身材料; 多波段隐身; 隐身原理

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.07.001

Research Status and Progress of Infrared & Radar Compatible Stealth Materials

WANG Xin-kun, ZHAO Fang*, WANG Jian-jiang

(Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: With the advent of various new types of detection radars, advanced infrared detectors and precision guided weapons, infrared & radar compatible stealth materials have become the focus of current stealth technology research. The stealth principle and research status of traditional and new infrared & radar compatible stealth materials are reviewed, and the development direction of future infrared & radar compatible stealth materials is summarized and forecasted.

Key words: infrared & radar compatible stealth material; multi-band stealth; stealth principle

0 引言

随着高新技术的发展以及各国军事力量的增强, 各种军事侦察手段日新月异, 现代电子侦察设备几乎涵盖了所有可利用的电磁波段, 探测技术正在向复合化、智能化方向发展^[1-4]。在众多探测技术中, 雷达探测和红外探测是两种最有效和最普遍的探测技术。因此, 红外/雷达兼容隐身材料在隐身领域成为了学者们的重点研究对象^[5]。

雷达和红外两个波段的隐身对材料电磁特性的要求是相互制约的。其中, 雷达隐身要求吸波材料在一定频率范围(如 2~18 GHz)内对电磁波强烈吸收, 即具有低反射、高发射特性; 而红外隐身则要求材料在红外波段(3~5 μm 和 8~14 μm)具有高反射、低发射特性。另外, 雷达吸波材料会使入射电磁波衰减进而将其转换成热量, 造成目标温度升高, 而这又不利于红外隐身。经过国内外研究人员的多年

收稿日期: 2019-05-24

作者简介: 汪心坤(1993-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事纳米功能材料研究。

*通讯作者: E-mail: 1156822436@qq.com

钻研,发现有些材料在红外/雷达兼容隐身方面具有一定的应用潜力。本文结合近年来国内外的研究现状及进展,重点阐述了几种红外/雷达兼容隐身材料的隐身原理和研究现状。

1 传统红外/雷达兼容隐身材料

1.1 纳米材料

纳米材料具有优异的吸波性能^[6]。一方面,纳米材料的表面原子比例高、悬挂键多,因此具有较强的表面活性,可增加对入射电磁波的吸收;另一方面,量子尺寸效应会使分裂的电子能级处在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ eV 范围内,为吸收入射电磁波创造了新通道。另外,红外光的波长远大于纳米颗粒的尺寸,导致纳米材料对红外光具有高透过率,使红外探测器接收到的反射信号变得很微弱,进而实现红外隐身效果^[7]。红外/雷达兼容纳米隐身材料研究主要包括纳米金属与合金吸收剂、纳米磁性纤维吸收剂、碳纳米管吸收剂等几个方面。

1.1.1 纳米金属与合金吸收剂

纳米金属微粉及其合金吸收剂具有较低的红外发射率以及较大的磁导率和介电常数,在雷达波段拥有优异的吸波性能^[8]。张静^[9]采用固相法制备了 SmFeO_3 纳米粉末,并测试了样品的微波电磁特性及其红外发射率。结果表明,当样品厚度为 2 mm 时,它在 15.8 GHz 处具有最大反射损耗(-10 dB),且红外发射率的最小值为 0.58。武晓威等人^[10]采用均匀共沉淀法制备了包覆完整的 ZnS/Al 复合材料,并对其吸波性能和红外发射率进行了测试。结果表明,

该粉体在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的最小红外发射率为 0.452,在 12 GHz 处具有最大微波反射损耗(-16.73 dB)。Pan S J 等人^[11]采用两步球磨法制备了片状 FeAl 复合材料(见图 1),并研究了球磨时间对其红外发射率及微波吸收的影响。结果表明,当球磨时间为 30 min 时,该混合物表现出了优异的雷达/红外兼容特性(见图 2)。它在 6.5 GHz 处具有最大反射损耗(-13.6 dB),低于 -10 dB 的吸收宽带为 1.7 GHz,在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的红外发射率约为 0.1。

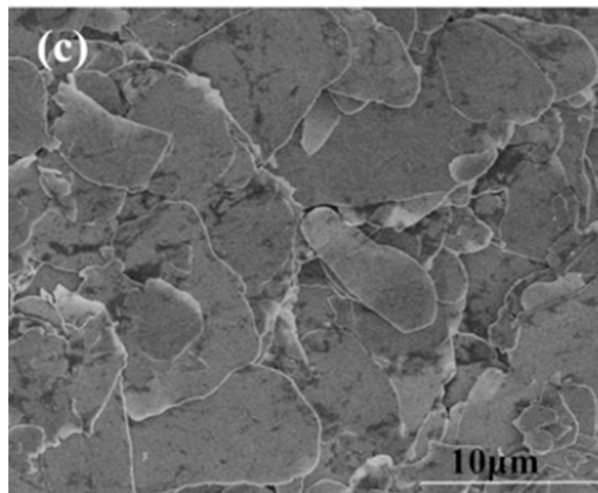


图 1 FeAl 复合材料的 SEM 照片

1.1.2 纳米磁性纤维吸收剂

纳米磁性纤维吸收剂^[12-13]由于纤维形貌的各向异性而具有丰富的电磁波损耗机制。另外,纤维粒径尺寸为纳米级,长度为微米级,有较大的长径比,会对其红外反射特性产生特定影响。

于斌^[14]采用熔融纺丝法制备了一种芯层

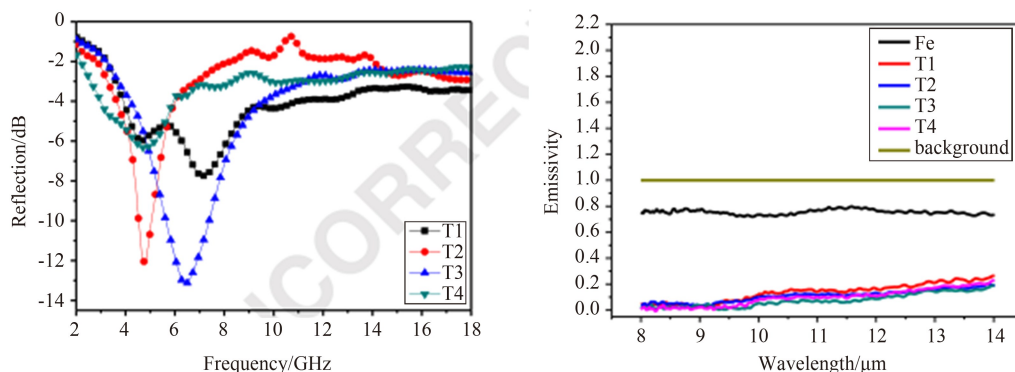


图 2 FeAl 复合材料的反射损耗及红外发射率

为聚丙烯与吸波剂混合物、皮层为金属粉与聚丙烯混合物的新型纤维。经研究发现,当金属粉的含量为 15% 时,该纤维的微波反射损耗低于 -10 dB 的频宽可达 2.39 GHz,最小红外发射率为 0.62。

1.1.3 碳纳米管吸收剂

纳米碳管由于特殊结构及尺寸而具有良好的导电性能。碳管的微观结构为中空,这就为其管壁改性和管内掺杂提供了可能。沈曾民等人^[15]采用化学镀法制备了镀镍碳纳米管复合材料。当匹配层的厚度为 0.97 mm 时,该材料在 8~18 GHz 范围内的反射损耗低于 -10 dB 的带宽为 2.23 GHz,可对提高材料的吸波性能产生有利影响。Zhang M 等人^[16]通过表面氧化将螺旋聚硅烷(Helical Polysilane, HPS)包覆在改性的碳纳米管表面周围,制备了 HPS/f-MWNTs 复合材料(见图 3)。经研究发现,该材料在 8~14 μm 波段的红外发射率为 0.576,明显低于纯 HPS 和 f-MWNTs (见表 1)。这是由于 HPS 的特定螺旋构象的协同效应以及有机聚合物与无机纳米粒子之间得到改善的界面相互作用所致。Pan W 等人^[17]成功制备了用聚酰胺(Polyamide, PA)包覆多壁碳纳米管(Multi-walled Carbon Nanotubes, MWNTs)的复合物。结果表明,PA 在 MWNTs 表面上均匀包覆,没有损坏其内部结构(见图 4)。该样品在 9.7 GHz 处具有最大反射损耗(-20.65 dB),反射损耗小于 -10 dB 的有效吸收宽频为 3.2 GHz,在 8~14 μm 波

表 1 红外发射率数据

样品	红外发射率(8~14 μm)
MWNTs	0.802
f-MWNTs	0.781
HPS	0.598
HPS/f-MWNTs	0.576

段的红外发射率为 0.503,因此这种材料具有优异的红外/雷达兼容隐身效果(见图 5 和表 2)。

1.2 导电高聚物

聚苯胺、聚吡咯、聚乙炔和聚噻吩等导电高聚物因其具有结构多样性、复合加工简单、分子设计性强以及电磁参数易调控等而成为研究重点^[18-20]。通过化学加工可使该材料的室温电导率在金属、半导体和绝缘体范围内变化,有利于调控导电性,使其表现出优异的吸波性能。

导电高聚物的吸波机理是利用某些具有共轭 π 电子的高分子聚合物的线性或平面形构型与高分子电荷转移络合物的作用来设计其导电结构,实现阻抗匹配和介电损耗,从而吸收电磁波。经研究发现,当电导率 $\sigma < 10^{-4}$ s/m 时,导电高聚物材料没有吸波特性;当 $\sigma > 1$ s/m 时,材料具有金属特性,且有较好的电磁屏蔽作用;当 10^{-4} s/m $< \sigma < 1$ s/m 时,材料具有半导体性质,可表现出优异的雷达隐身性能。但是它存在吸波频率窄、性质不稳定等缺点,若将其与磁性纳米粒子或其他吸波材料复合,则有望发展成为一种新的轻质、宽频微波吸收材料。高磊等人^[21]采用化学氧化法制备了聚苯

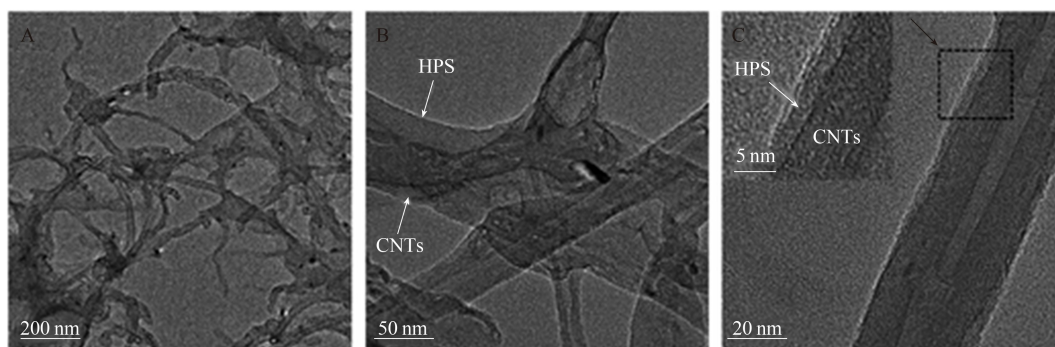


图 3 HPS/f-MWNTs 复合材料的透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)照片

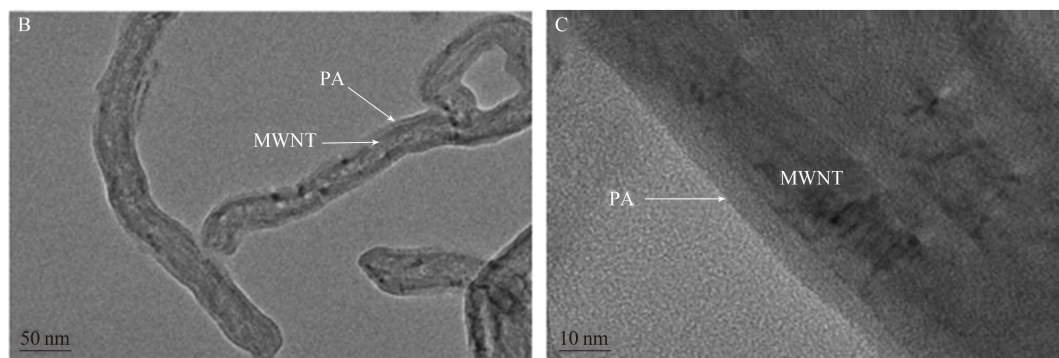


图 4 PA/MWNTs 复合材料的 TEM 照片

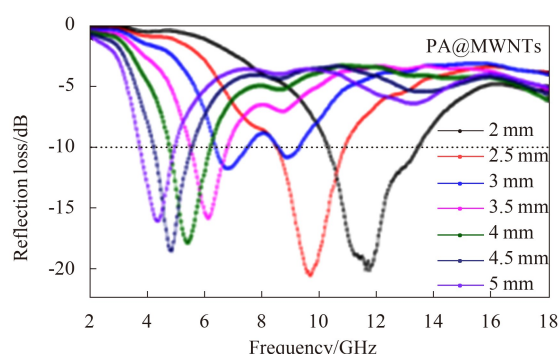


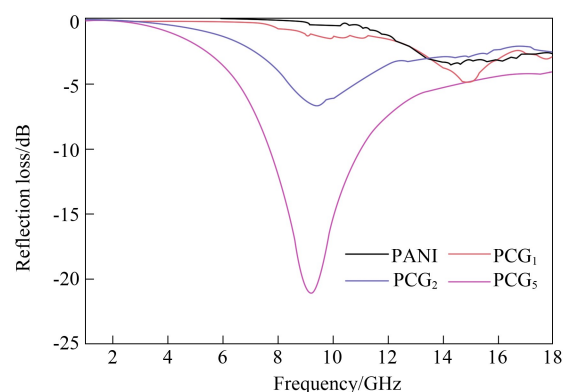
图 5 在 2~18 GHz 范围内 PA/MWNTs 材料的反射损耗曲线

表 2 样品在室温下的红外发射率

样品	红外发射率(8~14 μm)
MWNTs	0.795
PA	0.619
PA/MWNTs	0.503

胺(Polyaniline, PANI)与还原石墨烯复合材料,研究了石墨烯掺杂量对复合材料吸波性能的影响。结果表明,当样品厚度一定时,其吸波性能随着石墨烯含量的增加而变得越来越优异;当石墨烯含量为 5%、匹配层厚度为 3 mm 时,反射损耗小于等于 -10 dB 的有效吸收带宽为 3.3 GHz (7.8~11.1 GHz),并在 8.99 GHz 处具有大小为 -20.56 dB 的最低反射损耗(见图 6)。Li Z 等人^[22]采用溶胶-凝胶法制备了 $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PANI}$ 和 $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PPy}$ 复合材料,并对其微波吸收性能进行了测试。结果表明,该材料的吸波性能明显优于纯 NiFe_2O_4 材料。 $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{PPy}$ 复合材料的吸收频宽为 4.5 GHz,在 8 GHz 处的最低微波反射损耗为 -42 dB。Wang Y 等人^[23]采用水热法和原

位聚合方法成功制备了 $\text{MOF}(\text{Fe})/\text{PANI}$ 纳米复合材料。经研究发现,该材料可以有效提升吸波性能,其样品在 11.6 GHz 处具有最大反射损耗(-41.4 dB),反射损耗小于 -10 dB 的有效吸收带宽为 5.5 GHz。

图 6 $d=3$ mm 时, PANI 和 PCG_1 、 PCG_2 、 PCG_5 的理论反射损耗曲线

导电高聚物的电导率具有很大的可调节性,可使其具有类金属特性,因此具有较低的红外发射率。Yang C C 等人^[24]采用原位聚合法制备了 $\text{BaTiO}_3/\text{PANI}$ 、 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{PANI}$ 和 $(\text{BaTiO}_3 + \text{BaFe}_{12}\text{O}_{19})/\text{PANI}$ 复合材料,并对样品的吸波性能和红外发射率进行了测试。结果表明,这三种样品都表现出了优异的红外/雷达兼容隐身效果。周亦康^[25]采用“掺杂-脱掺杂-再掺杂”以及原位聚合的方法成功制备了樟脑磺碱掺杂的 PANI 材料,并研究了掺杂浓度对样品红外发射率以及微波性能的影响。结果显示,当掺杂浓度为 2:2 时,样品在红外辐射的大气窗口(3~5 μm 和 8~14 μm)波长下

的红外发射率分别为 0.46 和 0.29, 在 13.75 GHz 处达到最大反射损耗 (−27.43 dB), 9.84 ~ 18 GHz 范围内的反射率均低于 −10 dB。

导电高聚物在雷达/红外兼容隐身材料方面的研究及应用潜力十分巨大, 但是在实用化道路上还存在一些问题。由于链间存在很强的相互作用, 导电高聚物材料具有很差的溶解性, 致使可加工性变差。尽管可溶性聚合物在一定程度上改善了加工性能, 但是仍无法避免结构缺陷对其应用性能的不利影响。此外, 掺杂剂是通过扩散作用进入高聚物链中的, 因此它们之间仅仅依靠正负电荷中和来保持平衡, 不存在任何化学键, 使得导电高聚物性能不稳定, 并且导电高聚物的室温电导率会随时间逐渐减小, 从而影响适用范围。为了提高导电高聚物在雷达/红外兼容隐身方面的实用性, 必须要提高导电高聚物的加工性能及稳定性能^[26-27]。

1.3 掺杂氧化物半导体

作为一类重要的功能材料, 掺杂氧化物半导体具有优异的光、电、磁等特性, 在光降解、光催化和场效应晶体管等诸多领域有着广泛应用。它主要由金属氧化物(主体)和掺杂剂(载流子供体)组成, 如 SnO_2 、 InSnO_3 (ITO)、 In_2O_3 等。在红外吸收波段, 由于红外光的波长较长, 光子能量小于半导体禁带宽度, 半导体材料对其不存在本征吸收。对光子吸收起主要作用的是自由载流子^[28-29]。根据半导体连续光谱理论, 红外光在半导体中的传播特性与等离子频率 ω_p 有关:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (1)$$

或由波长表示:

$$\lambda_p = \frac{2\pi c}{e} \sqrt{\frac{\epsilon_0 m}{N}} \quad (2)$$

式中, m 为有效电子质量; c 为光速; ϵ_0 为真空介电常数; e 为电子电荷; N 为载流子浓度。

经研究发现, 当入射电磁波的频率发生变化时, 掺杂氧化物半导体的红外发射率也会随之改变。当入射电磁波的频率与等离子

频率一致时, 自由载流子与入射电磁波相互作用, 产生共振效应, 使其红外发射率增大。在提高自由载流子浓度时, 共振吸收峰会向红外波段移动, 使其对红外光产生高反射率(见图 7)。根据式(1)和式(2)可知, 等离子体频率主要与载流子浓度 N 有关, 而载流子浓度则可通过控制掺杂条件进行调整。因此, 经过适当调整, 可以使掺杂氧化物半导体具有良好的红外隐身效果。

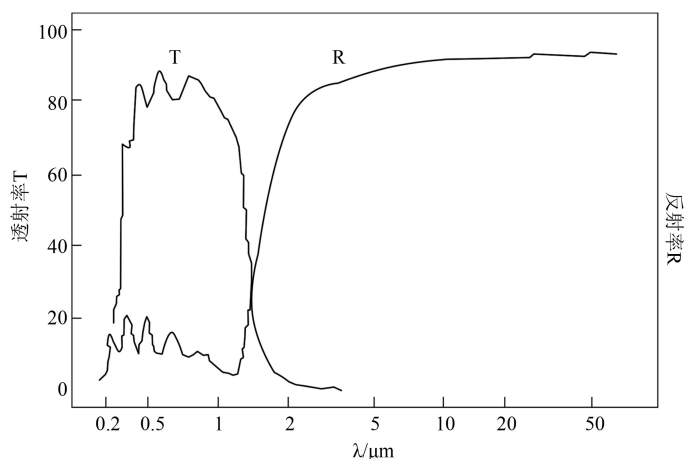


图 7 掺杂半导体材料的透射率和反射率示意图

掺杂氧化物半导体材料的雷达波吸收机理为介电损耗, 主要是传导损耗和电极化, 这取决于复介电常数虚部 ϵ'' 值的大小。在入射电磁波的作用下, 氧化物半导体体会发生电子极化、离子极化、固有偶极子的取向极化和界面极化。其中, 电子极化和离子极化具有恢复力大、阻尼小的特征, 它们的共振频率出现在紫外和红外波段, 因此在微波范围内对入射电磁波几乎没有任何吸收。而固有偶极子极化及界面极化属于弛豫型极化, 均有较大的阻尼和较小的恢复力, 其共振频率都在射频区域以及微波区域, 所以在微波范围内引起的介电损耗相对较强, 由此决定虚部 ϵ'' 的大小。随着掺杂量的增加, 材料中的离子数及电偶极子数增多, 而不同价态离子间会出现电子转移, 导致电导率增大。根据弛豫型极化理论, 复介电常数的虚部 ϵ'' 值随着电导率的增加而增大。

材料的吸收系数为

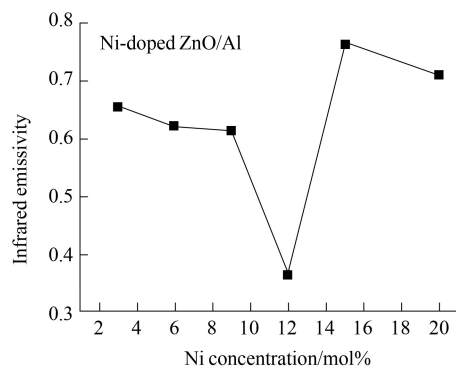
$$\alpha = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\left(\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right)^2}{\epsilon'^2}} \right]} \quad (3)$$

根据 Hugan-Rubens 近似理论, 材料的反射率为

$$R \approx 1 - (\epsilon_0 \omega / \sigma)^{1/2} \quad (4)$$

式中, ω 为入射波的频率; σ 为电导率; ϵ_0 为真空介电常数。从式(3)和式(4)中可以看出, ϵ' 、 ϵ'' 、 σ 和 ω 等参数决定雷达吸收系数和反射率的大小。因此, 可通过选取合适的氧化物半导体材料、掺杂元素以及制备工艺来获得最优参数, 从而实现良好的雷达隐身效果。

Fernandes G E 等人^[30]制备了掺铝氧化锌, 发现样品在中远红外波段具有较低的红外发射率, 并且在 1~30 GHz 范围内的反射率损耗最高可达 -22 dB。Shu R W 等人^[31]采用化学共沉淀法制备了 Ni 掺杂的 ZnO/Al 复合纳米材料。当 ZnO 浓度为 50 wt%, Ni 掺杂浓度为 12 mol% 时, 复合材料具有最小红外发射率 (0.37)。当匹配层的厚度为 4.5 mm 时, 13.6 GHz 处的反射率达到 -32.5 dB, 使得该材料具有优异的红外/雷达兼容隐身效果(见图 8)。Zhang Z Y 等人^[32]采用水热法成功制备出了一种具有层状结构的 SnO₂/ZnO 纳米复合材料, 并研究了其红外发射率和雷达波吸收性能。结果表明, 该材料在 9.2 GHz 处具有最大反射损耗(-23.51 dB), 有效吸收带宽(反射损耗小于 -10 dB)为 3.5 GHz, 中红外和远红外波段的平均红外发射率分别为 0.65 和 0.89, 红外/雷达兼容隐身性能明显优于 ZnO 或 SnO₂



材料。

掺杂氧化物半导体材料的制备过程简单, 应用广泛, 但性能稳定性差, 限制了其进一步发展。这就需要运用多元化手段, 通过复合化处理来改善其性能稳定性, 并从理论上加以创新。

2 新型红外/雷达兼容隐身材料

随着物理学和化学的飞速发展, 越来越多的新型材料被发现并制备出来, 例如电磁超材料和光子晶体等。由于具有一些特殊的物理化学性能, 它们在军事战争领域有着巨大的应用潜力。

2.1 光子晶体

光子晶体是 20 世纪 90 年代快速发展起来的一种具有周期性介电结构的新型人工结构材料^[33]。由于光子晶体存在光子带隙, 特定频率的电磁波无法在光子晶体中传播而被完全反射, 因此利用禁带位于红外探测器工作波段的光子晶体, 可以有效抑制目标红外辐射传播, 从而实现红外隐身^[34-35]。刘必鑫等人^[36]采用 SiO₂ 和 CdSe 制备的一维光子晶体在中远红外波段存在很强的反射禁带。为了扩展光子带隙, 他们构造出了一种双周期异质结 CdSe/SiO₂ 光子晶体。如图 9 所示, 该晶体表现出了高反射特性。Fleming J G 等人^[37]通过用化学气相沉积法将钨回填在去除 Si 的多晶硅/SiO₂ 结构上, 制备了在 8~12 μm 波段表现出高反射特性的三维光子晶体(见图 10 和图 11)。图 10 中, 数字表

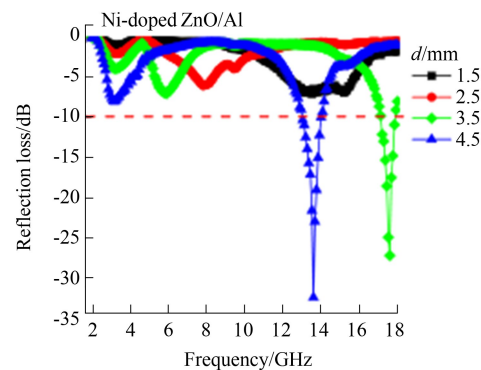


图 8 样品的红外发射率(a)及反射损耗(b)

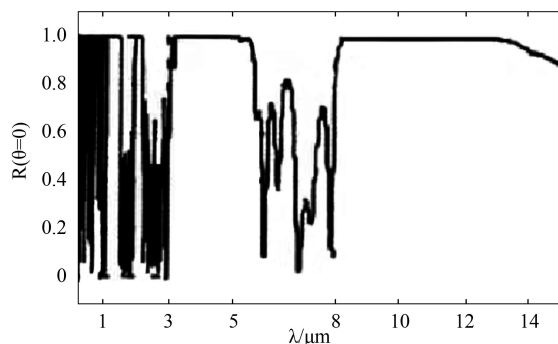


图 9 双周期异质结一维光子晶体的反射光谱

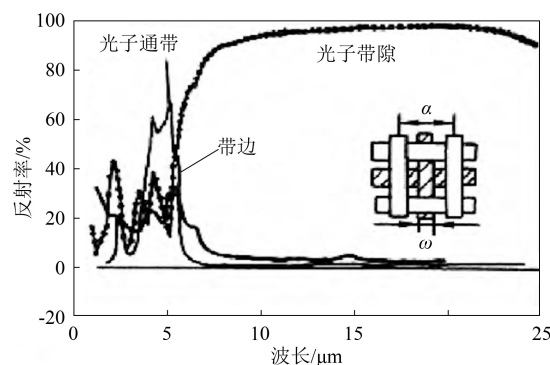


图 11 三维光子晶体的反射谱图

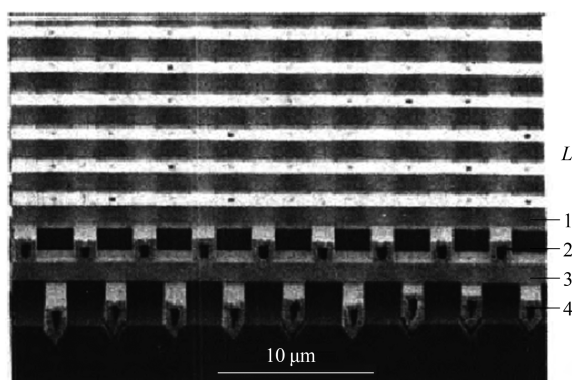


图 10 三维光子晶体的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片

示硅棒层数, L 表示硅棒之间的距离。

光子晶体在微波波段具有电磁带隙, 可表现出不同于其他材料的电磁特性, 因此在雷达波吸收方面具有很大的应用潜力。Wang Q 等人^[38]成功制备出了一种具有 4 个异质结构的光子晶体, 且每个异质结构的 Ge/ZnS 介质层的厚度不同。结果表明, 该材料在中远红外波段的反射率高于 90%, 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度分别为 0.073 和 0.042; 而且该样品在雷达波段具有很高的透过率(见图 12), 完全可以实现红外雷达兼容隐身。

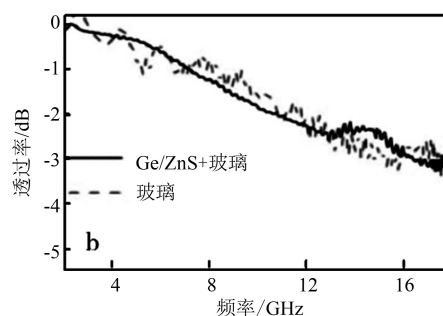
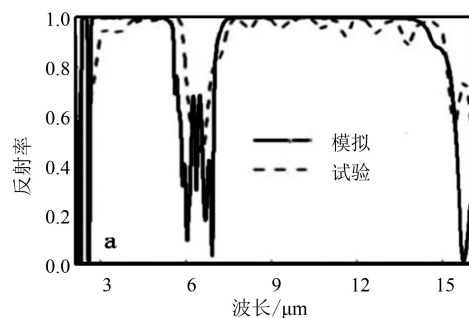


图 12 Ge/ZnS 光子晶体的红外反射性能和(2~18 GHz)雷达波段透过性能

Wang Q 等人^[39]制备了基于硒化锌、锗以及掺杂硅的一维光子晶体(见图 13)。结果表明, 该光子晶体不但对太赫兹波具有很好的透射性, 而且在中远红外波段也具有优异的红外发射率。这些新颖的光子晶体制作技术为红外/雷达兼容隐身材料的制备提供了新思路。

光子晶体因其结构设计性强、性能易调控而成为红外雷达兼容隐身材料的研究热点, 但是目前该研究尚处于理论和实验探索初期。要想实现在军事装备上的应用, 还有两个方面的问题亟待解决: (1)制造高质量的三元光子晶体; (2)实现光子晶体隐身材料的规模化生产及应用^[40-41]。

2.2 超材料

一般来说, 超材料是指人工制备的一种具有亚波长周期性结构并呈现出天然材料所不具备的超常物理性质(如负磁导率、磁导率与介电常数双负、负折射、亚波长超透射等)的复合材料。由于该材料具有可设计性, 人们能够设计出特定电磁参数的超材料结构单元, 使其在特定频点或频段内对电磁波进行

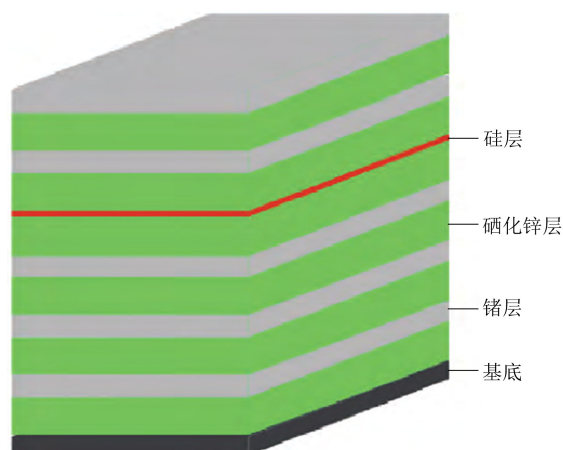


图 13 一维光子晶体的结构简图

有效吸收。

Landy N 等人^[42]设计出了一种具有三明治结构的超材料 MPA (见图 14)。该结构在 11.65 GHz 处具有明显的共振效应,可对电磁波进行有效吸收。通过理论计算可知,当超材料单元为亚波长尺寸时,MPA 的工作频率可以扩展到红外以及可见光波段。李君哲等人^[43]通过对频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)进行分析,认为选取合理的结构参数后便可获得良好的兼容隐身效果。他们最后设计出了 FSS/RPP 复合超材料。结果表明,该材料可以较好地实现红外/雷达兼容隐身。何路^[44]设计了一种具有全金属结构的超材料吸波体。该吸波体由多级金属凹槽(Multi-level Metal Groove, MMG)组成(见图 15)。当 MMG 凹槽高度为 9.5 mm 时,MMG 超材料表现出

优异的吸波性能,反射损耗小于等于 -20 dB 的吸收峰总共有 6 个(8~20 GHz),8~14 μm 波段的红外发射率小于 0.05 (相应反射率大于 95%),从而实现了红外/雷达兼容隐身。

随着材料制备水平以及探测技术的快速发展,传统材料红外/雷达兼容隐身性能的提升将会面临巨大挑战。超材料由于具有超常的物理特性而得到科研人员的青睐,为红外/雷达兼容隐身材料的发展提供了新方向。然而,作为一种全新的材料系统,超材料的相关研究目前仍以模拟仿真为主,离实际应用阶段还存在一系列技术障碍。随着科研人员的不懈探索与研究,超材料将会在红外/雷达兼容隐身领域发挥更大、更关键的作用。

3 总结

随着微电子技术的不断发展以及各种先进探测器的相继问世,单一波段隐身材料难以满足现代战争的需求,因此隐身材料研究需要向多波段兼容隐身方向发展。红外/雷达兼容隐身技术不仅是隐身材料发展的需要,而且也是国家军事力量发展的需要。目前,红外/雷达隐身材料的发展虽然取得了一定的研究成果,但是仍然还存在红外/雷达兼容隐身机理研究不透彻、制备工艺不完善、材料稳定性差等问题。随着科技的不断进步以及红外/雷达兼容隐身材料研究的不断深入,这些问题都将会迎刃而解,红外/雷达兼容隐身材料也必将在未

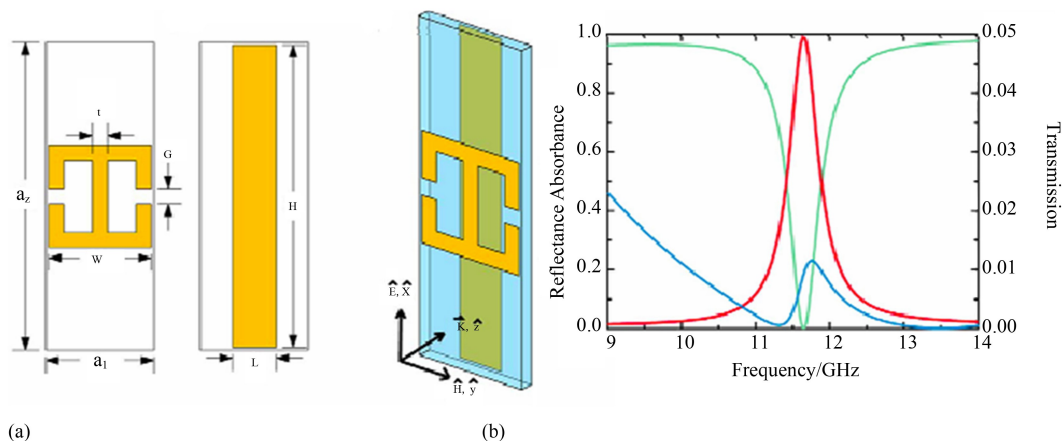


图 14 超材料 MPA 的结构示意图: (a)单元胞模型图; (b)反射、透射和吸收强度示意图

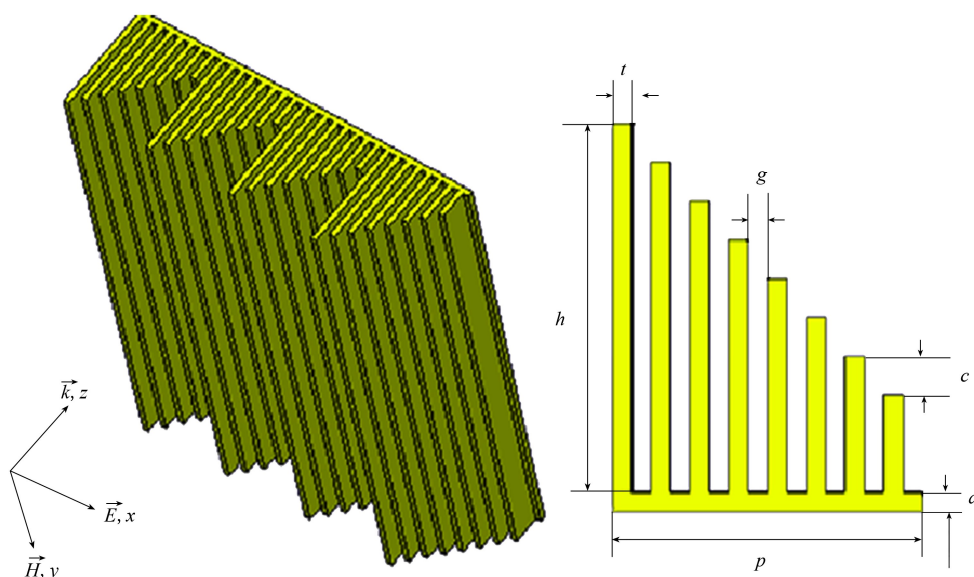


图 15 全金属 MMG 兼容隐身超材料单元的结构简图 ($h=9.5$ mm, $p=8$ mm, $c=1$ mm, $d=0.5$ mm, $t=0.5$ mm, $g=0.5$ mm)

来隐身领域大放异彩。

参考文献

- [1] 白天, 王秀兰. 隐身材料的现状及发展趋势 [J]. 宇航材料工艺, 2015, **45**(6): 8–10.
- [2] 陶宇, 陶志萍. 雷达隐身技术的研究现状及其展望 [J]. 材料导报, 2011, **25**(6): 40–45.
- [3] 张亚坤, 曾凡, 戴全辉, 等. 雷达隐身技术智能化发展现状与趋势 [J]. 战术导弹技术, 2019, **40**(1): 56–63.
- [4] Chen Y, Zhang H, Gao W, et al. The Preparation and Infrared Radar Stealth Performance Test of a New Paraffin-based Phase Transition Microcapsule [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, **1955**: 030063.
- [5] Tian H, Liu H T, Cheng H F. A Thin Radar-infrared Stealth-compatible Structure: Design, Fabrication, and Characterization [J]. *Chinese Physics B*, 2014, **23**(2): 1–6.
- [6] 伊翠云. 纳米吸波材料的研究现状与发展趋势 [J]. 纤维复合材料, 2014, **3**(1): 43–46.
- [7] Xu S Q, Duan Y F. Research Progress and Prospects of New Absorbing Materials [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2001, **15**(1): 45–48.
- [8] 翟华璋, 李建保, 黄勇. 纳米材料和纳米科技的进展、应用及产业化现状 [J]. 材料工程, 2001,

13(11): 43–48.

- [9] 张静. SmFeO_3 的制备及其多波段兼容隐身性能研究 [J]. 功能材料, 2011, **42**(S1): 141–143.
- [10] 武晓威, 冯玉洁, 陈宇, 等. 复合粒子的制备及其多波段兼容隐身性能的研究 [J]. 人工晶体学报, 2012, **41**(3): 798–802.
- [11] Lv H L, Ji G B, Li X G, et al. Microwave Absorbing Properties and Enhanced Infrared Reflectance of FeAl Mixture Synthesized by Two-step Ball-milling Method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, **374**: 225–229.
- [12] 王荣超, 于祺, 陈平, 等. 静电纺丝法制备纳米纤维吸波材料的研究进展 [J]. 纤维复合材料, 2015, **7**(3): 7–10.
- [13] Chiscan O, Dumitru I, Postolache P, et al. Electrospun PVC/ Fe_3O_4 Composite Nanofibers for Microwave Absorption Applications [J]. *Materials Letters*, 2012, **68**: 251–254.
- [14] 于斌. 多功能隐身纤维性能的研究 [J]. 材料工程, 2006, **51**(S1): 87–89.
- [15] 沈曾民, 赵东林. 镀镍碳纳米管的微波吸收性能研究 [J]. 新型炭材料, 2001, **16**(1): 1–4.
- [16] Zhang M, Zhou Y, He M, et al. Helical Polysilane Wrapping onto Carbon Nanotube: Preparation, Characterization and Infrared Emissivity Property Study [J]. *Rsc Advances*, 2016, **6**(9):

- 7439–7447.
- [17] Pan W, He M, Bu X, et al. Microwave Absorption and Infrared Emissivity of Helical Polyacetylene@Multiwalled Carbon Nanotubes Composites [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, **28**(12): 8601–8610.
- [18] 张捷, 刘伟, 张婷, 等. 导电聚合物基复合吸波材料的研究进展 [J]. *微纳电子技术*, 2018, **55**(2): 91–97.
- [19] 张麟, 杜文雅, Amit Nautiyal, 等. 纳米结构导电聚合物及其复合材料的研究进展: 制备、应用和展望 [J]. *Science China Materials*, 2018, **61**(3): 1–50.
- [20] Wang G, Morrin A, Li M, et al. Nanomaterial-doped Conducting Polymers for Electrochemical Sensors and Biosensors [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018, **25**(6): 4173–4190.
- [21] 高磊, 何大伟, 王永生. 聚苯胺与还原石墨烯复合材料的微波吸收性能 [J]. *发光学报*, 2018, **39**(10): 21–25.
- [22] Li Z, Ye M, Han A, et al. Preparation, Characterization and Microwave Absorption Properties of NiFe_2O_4 and Its Composites with Conductive Polymer [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, **27**(1): 1031–1043.
- [23] Wang Y, Zhang W, Wu X, et al. Conducting Polymer Coated Metal-organic Framework Nanoparticles: Facile Synthesis and Enhanced Electromagnetic Absorption Properties [J]. *Synthetic Metals*, 2017, **228**: 18–24.
- [24] Yang C C, Gung Y J, Hung W C, et al. Infrared and Microwave Absorbing Properties of BaTiO_3 /Polyaniline and BaFeO_3 /Polyaniline Composites [J]. *Composites Science & Technology*, 2010, **70**(3): 466–471.
- [25] 周亦康. 聚苯胺、聚吡咯及其复合物的红外辐射及微波性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [26] Yan L, Wang X, Zhao S, et al. Highly Efficient Microwave Absorption of Magnetic Nanospindle-Conductive Polymer Hybrids by Molecular Layer Deposition [J]. *Acs Appl Mater Interfaces*, 2017, **9**(12): 11116–11125.
- [27] Yan W, Zhang W, Wu X, et al. Conducting Polymer Coated Metal-organic Framework Nanoparticles: Facile Synthesis and Enhanced Electromagnetic Absorption Properties [J]. *Synthetic Metals*, 2017, **228**: 18–24.
- [28] 马成勇, 程海峰, 唐耿平, 等. 红外/雷达兼容隐身材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2007, **21**(1): 126–128.
- [29] 马格林, 曹全喜, 黄云霞. 红外和雷达复合隐身材料——掺杂氧化物半导体 [J]. *红外技术*, 2003, **25**(4): 77–80.
- [30] Fernandes G E, Lee D J, Kim J H, et al. Infrared and Microwave Shielding of Transparent Al-doped ZnO Superlattice Grown via Atomic Layer Deposition [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, **48**(6): 2536–2542.
- [31] Shu R W, Xing H L, Cao X L, et al. Preparation, Microwave Absorption and Infrared Emissivity of Ni-doped ZnO/Al Powders by Coprecipitation Method in the GHz Range [J]. *Nano*, 2016, **11**(4): 1650047.
- [32] Zhang Z Y, Xu M Z, Ruan X F, et al. Enhanced Radar and Infrared Compatible Stealth Properties in Hierarchical SnO_2 @ZnO Nanostructures [J]. *Ceramics International*, 2017, **43**(3): 3443–3447.
- [33] Chen S, Guo L, Ji M, et al. Photonic Crystal Enhanced Laser Desorption and Ionization Substrate for Detection of Stress Biomarkers under Atmospheric Pressure [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, **7**(6): 908–914.
- [34] Wang F, Cheng Y Z, Wang X, et al. Effective Modulation of the Photonic Band Gap Based on Ge/ZnS One-dimensional Photonic Crystal at the Infrared Band [J]. *Optical Materials*, 2018, **75**: 373–378.
- [35] Kassa-Baghdouche L, Cassan E. Mid-infrared Refractive Index Sensing Using Optimized Slotted Photonic Crystal Waveguides [J]. *Photonics & Nanostructures*, 2018, **28**: 32–36.
- [36] 刘必鑒, 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**(9): 512–515.

- [37] Fleming J G, Lin S Y, El-Kady I, et al. All-metallic Three-dimensional Photonic Crystals with a Large Infrared Bandgap [J]. *Nature*, 2002, **417** (6884): 52–55.
- [38] Wang Z, Cheng Y, Nie Y, et al. Design and Realization of One-dimensional Double Hetero-structure Photonic Crystals for Infrared-radar Stealth-compatible Materials Applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(5): 054905.
- [39] Wang Q, Wang J, Zhao D, et al. Investigation of Terahertz Waves Propagating through Far Infrared/CO₂ Laser Stealth-compatible Coating Based on One-dimensional Photonic Crystal [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **79**: 144–150.
- [40] Zhang J K, Shi J M, Zhao D P, et al. Realization of Compatible Stealth Material for Infrared, Laser and Radar Based on One-dimensional Doping-structure Photonic crystals [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 62–65.
- [41] 孟子晖, 李仁玢, 邱丽莉, 等. 多波段兼容隐身用光子晶体研究进展 [J]. *兵工学报*, 2019, **40** (1): 198–207.
- [42] Landy N, Sajuyigbe S, Mock J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 207402.
- [43] 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.
- [44] 何路. 宽带极化转换与红外/雷达兼容隐身超材料的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.