

光学透明吸波材料的研究进展及未来发展方向

王 腾, 钱明灿, 张 莉, 安俊娥, 许晓丽, 赵亚娟, 周必成

中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

收稿日期: 2022年9月27日; 录用日期: 2022年10月20日; 发布日期: 2022年10月27日

摘 要

在有透光率要求场合的应用背景下, 光学窗口部位是电磁防护的薄弱部位, 该部位不仅要具有较高的透光特性, 而且需要具有雷达波吸收功能, 但是由于光学透明吸波材料受限, 多年来, 采用反射性结构电磁防护透明材料实现电磁波损耗吸收。随着新材料新技术的发展, 吸收型电磁防护透明材料步入舞台, 加快了电磁防护透光材料在透明吸波技术领域的应用。本文针对吸收型电磁防护透明材料发展历程, 从多层渐变介质吸收、谐振吸收、损耗吸收、复合吸收等角度进行分析, 并提出了光学透明吸波材料的未来发展方向。

关键词

光学透明, 吸波材料, 干涉型, 电路模拟, 超材料, 石墨烯

Progress and Future Development of Transparent Optically Absorbing Materials

Teng Wang, Mingcan Qian, Li Zhang, Jun'e An, Xiaoli Xu, Yajuan Zhao, Bicheng Zhou

No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

Received: Sep. 27th, 2022; accepted: Oct. 20th, 2022; published: Oct. 27th, 2022

Abstract

The optical window area is the weak part of the electromagnetic shielding in the condition of light transmittance requirement, the area should not only has high transmission characteristics, but also need to have the function of radar wave absorbing, but due to the limited optical transparent absorbing materials, over the years, electromagnetic wave loss absorption is realized by adopting

reflective structure electromagnetic protection transparent material. With the development of new materials and technologies, due to the extensive research of absorbing transparent materials for electromagnetic protection, the electromagnetic protective transparent material in the field of transparent wave-absorbing technology has also been accelerated. In this paper, the development of absorbing transparent materials for electromagnetic protection is analyzed from the perspectives of multilayer gradient medium absorption, resonant absorption, loss absorption and composite absorption, and the future development direction of optical transparent absorbing materials is proposed.

Keywords

Optical Transparency, Wave Absorbing Material, Interferometric, Circuit Simulation, Super Materials, Graphene

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在各种探测技术中, 雷达探测技术是最主要最普遍的探测手段。随着雷达探测技术的快速发展, 现代雷达系统可对探测目标实现宽频覆盖, 极大地削弱了在役武器装备的生存、突防能力, 出于军事隐身技术以及电磁屏蔽和防护等方面的应用需要, 透明部位的隐身技术有其特殊性, 要求在可见光波段有良好的透射率, 在常用雷达波段具有良好的抑制功能, 属于频率选择性吸波材料, 武器装备对宽频吸波电磁防护透明材料的需求越来越迫切。

高隐身性能是新一代武器装备的标志性特征, 已成为世界各国新研装备的最重要指标, 发展高性能的透明吸波材料在军事装备隐身、电磁信息安全、民用电子设备防护等方面有着重要的意义。为了满足在飞机座舱[1]、舰船驾驶舱[2]、电子不停车收费系统(ETC) [3]、射频识别系统[4]、无线通讯[5]、室外灯罩、仪器表盘、会议室窗口玻璃、显示屏等特定场景的柔性电子器件等透明玻璃部件均存在隐身需求, 光学透明吸波材料除了需要有高的可见光透过率外, 还需要具有宽带的吸收性能。

目前, 战斗机机舱玻璃和舰船驾驶舱玻璃多使用低方阻的透明电磁屏蔽材料, 以防止机舱内部或驾驶舱内部电磁信息被外界侦测到[1]。然而, 低方阻的屏蔽材料必然带来较高的电磁散射, 这增加了目标的雷达散射截面(RCS), 成了目前隐身的一个短板。随着下一代隐身飞机与舰船综合隐身技术的发展, 对透明玻璃部件的隐身涂覆材料提出更高要求, 如透光率、宽带吸波、柔性、耐高温等。传统的吸波材料由于吸波介质对可见光有很强的吸收阻隔作用, 一般呈现出黑色, 无法满足透明的要求。现有的飞机隐身涂层均为非透明的, 无法应用在以上场景。

随着雷达探测系统和雷达技术的发展, 雷达探测频带愈来愈宽, 主要工作频段由 2 GHz~18 GHz 扩展至 0.5 GHz~40 GHz, 这就对透明吸波材料提出了更高要求。通常采用外形结构吸波设计和反射衰减吸收薄膜材料设计已无法满足宽频吸收效果, 必须采用通过阻抗匹配使入射波最大限度地进入吸波结构, 同时将进入的电磁波消耗掉来降低目标的雷达散射截面的方法, 才能与非透明部位匹配实现整体隐身效果。近年来, 采用 Salisbury 屏、Jaumann 屏“干涉型”薄膜材料、超材料电磁吸波结构和碳纳米管、C60 及石墨烯等碳纳米材料, 以及聚苯胺(PAn)等高分子聚合物、碳纳米材料与超材料吸波结构的复合设计, 形成具有吸收率高、易于调节且轻薄的静态和动态可调的新型透明吸波材料, 实现光学透明吸波材料具

备可见光波段透射和雷达波段抑制兼容功能[2]。

2. “导电膜”光学透明吸波材料的研究

在反射型结构隐身的基础上,依据 1940 年以后雷达吸波材料出现了 Salisbury 屏、Jaumann 屏和 Dallen-bach 吸收体[6]原理,为了提高 RAM 的性能,开发了一些新型材料,并广泛使用计算机辅助设计(CAD)和近代的优化方法应用于多层吸收体的研究[7] [8] [9] [10] [11]。RAM 吸收电磁波的物理机制为:RAM 界面上波的相干作用,以及入射于 RAM 体内的电磁能转变为热而消耗掉,因而它被广泛用来缩减/改变现行军用作战平台的雷达散射截面(RCS)。

单层透明导电氧化物薄膜(TCF)吸收薄膜材料是最早作为光学透明吸波材料,研究人员多使用金属薄膜材料、氧化铟锡(ITO)材料,TCF 吸波材料最早研究和隐身应用起源于美国。最初的溅射金膜有可见光透过率小于 70%、使用寿命短等缺点,现在美国空军主要使用第二代 TCF(即 ITO 薄膜),其最大的特点就是透光率高、化学稳定性好、与座舱基体附着力强、耐环境性能优良以及具有良好的雷达波和红外截止能力[12]。Kim [13]通过电路模拟设计了方阻为 $377\Omega/\square$ 的 ITO 薄膜,采用厚度满足 $\lambda/4$ 高介电常数的电介质形成电路薄膜层,实现了峰值达到 -20 dB 的电磁波反射衰减。目前,在现役的 F-15、F-16、F-18、F117 和 B-2 等战机上得到了广泛应用,但是技术是保密的。此外战机和卫星上多数光学探测器镜头也采用了 ITO 作为隐身材料[14]。

为了进一步拓展光学透明吸波材料吸波带宽[15] [16],根据 Salisbury 屏干涉吸收的原理[17],利用 TCF 替换 Salisbury 屏而形成类似 Salisbury 屏、Jaumann 屏和 Dallen-bach 吸收体的“干涉型”光学透明吸波材料。目前干涉型光学透明吸波材料的研究主要是基于金属网栅、透明导电氧化物(transparent conductiveoxides, TCO)及其复合体系或掺杂体系,比如将 ITO 薄膜与透明介质材料(硅酸盐玻璃、聚酯薄膜、有机玻璃等)制成复合结构,通过复合结构对电磁波的干涉相消损耗达到吸波目的,最终得到兼具透明性和吸波性的材料。杨盟[1]等将 ITO 薄膜、空白聚酯薄膜(厚度 0.1 mm)、有机玻璃(厚度 1.68 mm)裁剪成 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 的正方形,按照 ITO 表面层-透明介质层-ITO 反射层的顺序组合成复合结构,见图 1,最终得到吸波能力较强的透明吸波体,该吸波体在 Ku 带(12 GHz~18 GHz)范围波段衰减低于 -10 dB,峰值超过 -20 dB,且在可见光区透光率达到 68%。

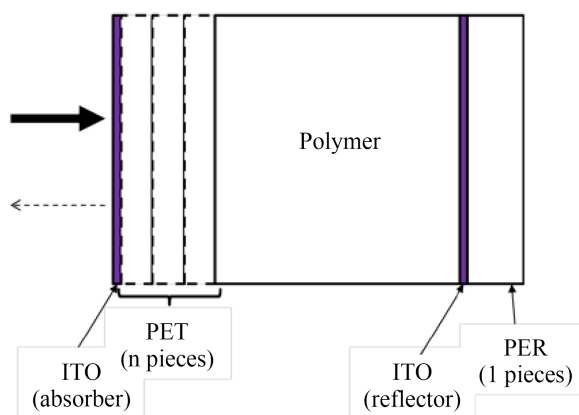


Figure 1. Typical structure of ITO transparent wave absorber [1]

图 1. ITO 光学透明吸波体典型结构图[1]

Masato Haruta [18]设计了两层不同方阻的 ITO 为吸收层和一层 $10\ \Omega/\text{sq}$ 的 ITO 反射层,PC 作为隔离层、采用胶粘结将两者复合成透明导电光学透明吸波材料。这种材料在 8.3 GHz~12 GHz 的频率范围内

90%以上的吸收。Osamu Hashimoto 等[19] [20] [21] [22]研究了电磁波的吸收性能与 ITO 的方阻的关系,当 ITO 方阻为 $10.8 \Omega/\square$ 时,雷达波反射率为 -25.09 dB , 并且制备由三层 ITO 薄膜层和隔离层组成的透明吸波体,其中两层作为吸波层,另外一层作为反射层,在 60 GHz 和 76 GHz 的吸波能力达到了 40 dB ,作者单位采用四层不同阻值的 ITO 吸收层和一层 $3 \Omega/\square$ 的 ITO 反射层,硼硅玻璃作为隔离层,采用匹配厚度的光学胶粘结将四层复合成光学透明吸波材料,实现了雷达波反射率 $\leq -10 \text{ dB}$ ($8 \text{ GHz} \sim 12 \text{ GHz}$) 的吸收衰减,吸收峰值在,峰值超过 -20 dB (频点 10.4 GHz),可见光区透光率达到 76.8% 。见图 2。

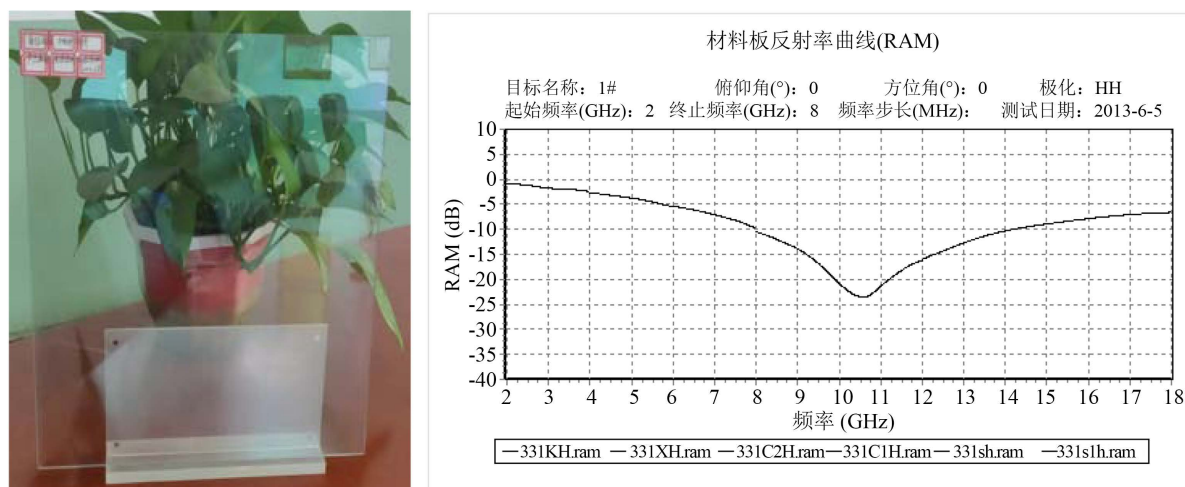


Figure 2. Samples of ITO transparent absorbing materials and test results

图 2. ITO 光学透明吸波材料样品及测试图

3. “超材料”光学透明吸波材料的研究

要使微波雷达吸收体获得所需要的带宽(典型为 $0.5 \text{ GHz} \sim 40 \text{ GHz}$)。研究者通过使用多层介质,产生多个谐振点的方式来拓宽吸收体的频带宽度,但多层的使用会使得可见光透过率降低。传统的吸波材料在解决宽带吸收与高可见光透过率的兼容方面显得捉襟见肘,而超材料具有可设计性强的特点,在设计吸波体中是一项很大的优势。随着实际需求的增加,研究人员开始使用超材料来设计光学透明吸波材料。

超材料是指一类具有天然材料所不具备的性能的人工复合材料,其中电磁超材料分为负折射率超材料、单负超材料、带隙超材料、手性超材料和频率选择表面基超材料等。第一个用超材料来设计吸波结构的是 Landry, 他于 2008 年提出由金属谐振环、金属条和介质基板构成的完美超材料吸波结构[23]。但是该超材料吸波结构是采用不透明材质,为了满足太阳能电池板、隐形飞机天顶等一些特殊场合实际应用需求,研究人员采用光学透明介质基板和导电结构,一般多选择玻璃基板和铟锡氧化物(Indium Tin Oxide, ITO)薄膜,开展了电路模拟型光学透明吸波材料、频率选择表面基光学透明吸波材料、立体超材料光学透明吸波材料方面的理论探索和实验验证研究。

1) 电路模拟型光学透明吸波材料

电路模拟型光学透明吸波材料把诸如薄条、网格、十字或更复杂的图形设计在透明导电材料上制成薄膜,取代在“Salisbury”或“Jaumann”吸波材料中的电阻片,能够得到另一类光学透明导电 RAMs,即电路模拟光学透明吸波材料(CA-RAMs)。这种由计算机设计并严格控制结构的透明导电薄膜能够增加可见光透过率,而屏蔽雷达波,并阻尼雷达波感应产生的电场,从而吸收雷达波,避免了反射型 TCF 的反射能量。与简单的吸收型材料相比,CA-RAMs 具有较好的隐身性能。迄今隐身水平最高的战斗机之一

的美国 F-117 飞机, 其座舱透明件就采用了 CA-RAMs。其实施方法就是将具有一定图形结构的透明薄膜电路网格植入透明高聚合物涂层中, 并与飞机连接成导电通路, 使得整个透明材料变成一个 CA-RAM, 据报道美国主力战斗机 F/A-22 采用了更为先进的 ITO 薄膜隐身材料, 但是具体技术还不清楚[14]。笔者研究单位也开展了六方形和分型 Y 型结构的电路模拟型光学透明吸波材料的研究, 设计的六方形和分型 Y 型结构单元如图 3 所示, 其中采用分型 Y 型结构设计制备的电路模拟型光学透明吸波材料在 6.7 GHz~17.2 GHz 的雷达波反射率 ≤ -10 dB, 透光率达到的经测试达到 83.2%, 见图 3。

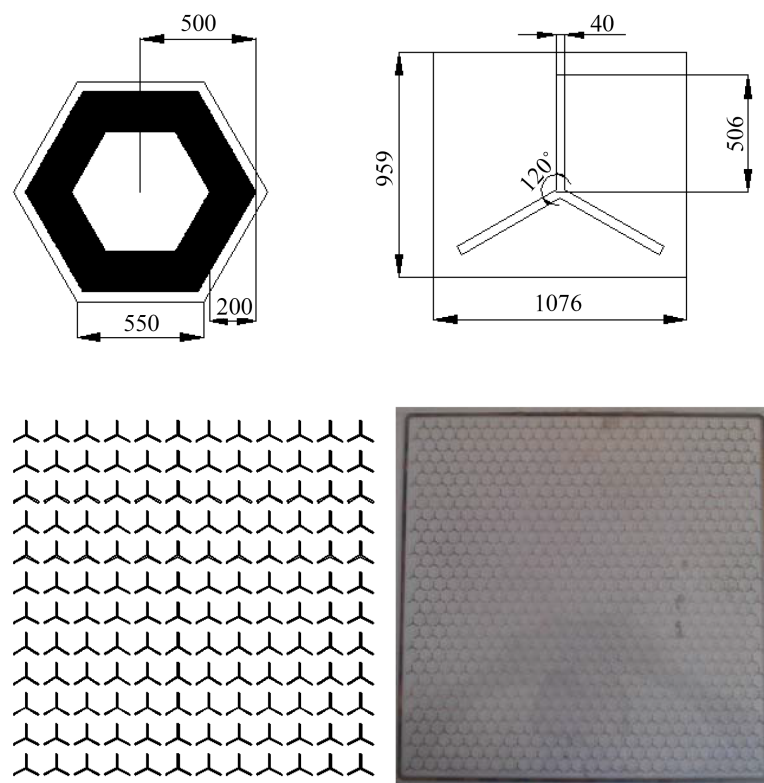


Figure 3. Circuit simulation transparent absorbing materials
图 3. 电路模拟型光学透明吸波材料图

早期的电路模拟吸收体就是用 FSS 替换 Salisbury 屏而形成, 近期提出了电调 FSS (主动/有源) 吸收体可看作是利用对入射电磁波振幅、相位二者周期性空间调制。因此, 这种吸收体的吸波机理除了普通材料所具有的之外, 还有经由相位调制把能量扩散到更宽的频带里去的作用。主动/有源吸收体有可能克服 Rozanov 提出的性能极限约束。进一步的发展也可施加一些智能功能如敌我识别、自适应 RCS 控制等等。

2) 频率选择表面基光学透明吸波材料

频率选择表面(frequency selective surfaces, FSS)是由特定形状的单元图形构成的一种二维周期阵列结构 FSS 能够较好地控制电磁波的传输和散射, 使入射电磁波发生全反射或全透射。FSS 就相当于一个对入射角、极化方式、频率等均有作用的空间滤波器。为了得到光学透明 FSS, 即具有在光学波段透明, 在雷达波段具有选择性全透射或者选择性全反射的特性, 国外在 2001 年最早对 ITO 透明导电膜 FSS 进行了简单的报道, 近年来, FSS 已经在微波、红外直至可见光波段得到广泛应用及其深入研究。其中李小秋[24]等运用谱域 Galerkin 法对光学透明带通频率选择表面(FSS)进行了分析计算, 研究了透明导电膜的电导率对光学透明带通 FSS 频率选择特性的影响。计算及实验结果表明: 在雷达波段, 透明导电膜的

电导率主要影响光学透明带通 FSS 在中心频率处的透过率,光学透明带通 FSS 在透可见反雷达波的同时,还具有选择性透过雷达波段的特性。测试结果表明:光学透明带通 FSS 在可见光波段的平均透过率能达到 85% 以上,在雷达波段中心频率处的透过率达到了 86%。显然,光学透明频率选择表面在飞行兵器复合制导窗口上有广泛应用前景。Marcello D'Amore [25]等采用等效电路分析了回字型 FSS 透明金属 Ag 膜等效的电阻 R、电感 L 和电容 C 的规律。运用谱域 Galerkin 法对光学透明带通频率选择表面(FSS)进行了分析计算,研究了透明导电膜的电导率对光学透明带通 FSS 频率选择特性的影响。计算及实验结果表明:在雷达波段,透明导电膜的电导率主要影响光学透明带通 FSS 在中心频率处的透过率,光学透明带通 FSS 在透可见反雷达波的同时,还具有选择性透过雷达波段的特性,见图 4。

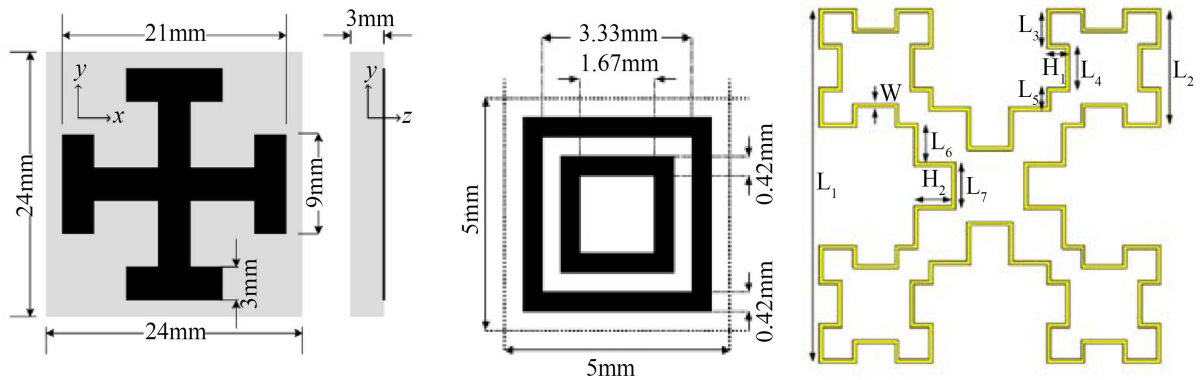


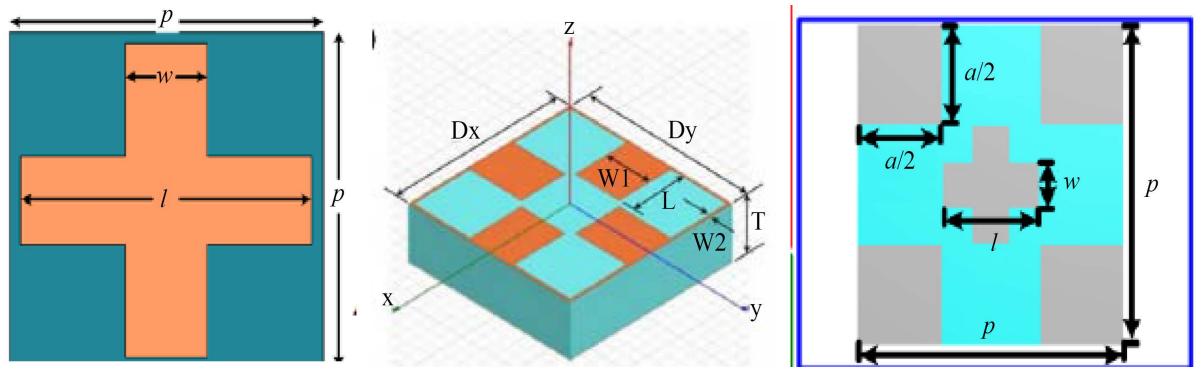
Figure 4. Construction unit of selected surface optical transparent absorbing materials [24] [25]

图 4. 频率选择表面光学透明吸波材料结构单元图[24] [25]

但是,目前学者们主要借助透明导电薄膜材料来制作光学透明频率选择表面的思想,运用谱域 Galerkin 法和采用等效电路方法,在理论上利用阻抗边界条件,推导出利用透明导电膜表面材料制作的光学透明频率选择表面的电磁场谱域积分方程。应用透明导电膜兼顾光学透明度高和电导率高的频率选择特性,实现了频率选择表面在光学透明吸波材料领域的应用。

3) “超表面”光学透明吸波材料

以超材料完美吸收为基础,采用由长方形、蝴蝶型、闭口环和 + 字架型以及相互组合结构组成的结构单元 + 介质基板 + 反射层的结构,以平面和立体结构与光学导电薄膜有机结合设计介电 - 谐振耗能超表面光学透明吸波材料,实现了轻量化、高透光率与宽频雷达波吸收的良好隐身功能和独特的工艺特点。研究者们设计并实现了一系列具有光学透明特性的雷达吸波体和散射体,典型的结构图见图 5 所示。



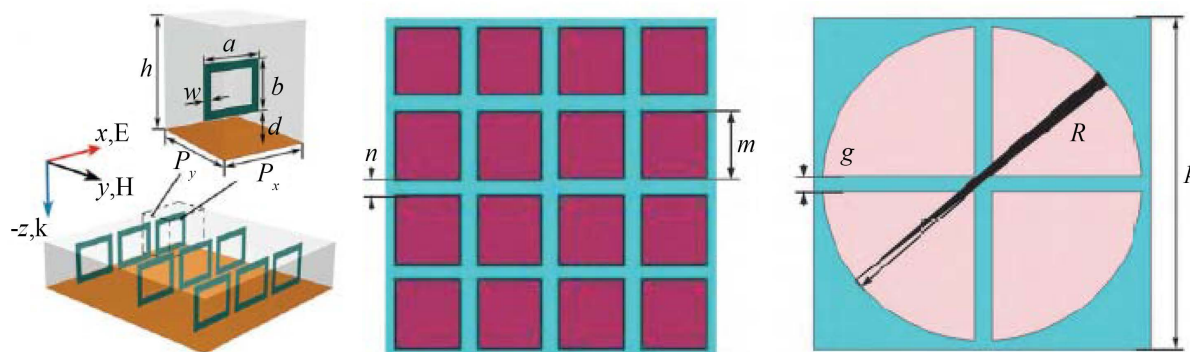


Figure 5. Supersurface structure of optical transparent absorbing materials [26] [27] [28] [29] [30]

图 5. “超表面”光学透明吸波材料结构图[26] [27] [28] [29] [30]

Table 1. Comparison of wave absorbing property of the supersurface structure of optical transparent absorbing materials reported in recent papers

表 1. 近年来报道的超材料结构光学透明吸收材料性能对比

结构单元	基材	薄膜种类	厚度	Bandwidth (GHz)及回波损耗(RL)	可见光平均透光率	Time	Reference
方块型结构单元	聚乙烯板	铝网格	材料厚度 5 mm	0.9 GHz~1 GHz (RL < -10 dB)	大于 75%	2012 年	[26]
金属微网构建蝴蝶型结构单元	聚二甲基硅氧烷柔性材料	铝网格	5 mm	5.8 GHz~12 GHz (RL < -10 dB)	大于 62%	2014 年	[27]
方块型结构单元	钠钙玻璃	ITO	2.1 mm	7.9~9.7 GHz (RL < -10 dB)	89%	2015 年	[28]
闭口谐振环(CRRs)拓扑结构	树脂玻璃	ITO	-	5.6~19 GHz 和 22~26.6 GHz 两个频段内能够保证吸波率大于 85%	大于 71%	2017 年	[29]
方形结构与扇形结构单元复合体	聚对苯二甲酸乙二醇酯	ITO	3.3 mm	8.0~32.0 GHz 频带内吸收率高于 90%的宽带吸波	大于 68%	2021 年	[30]

表 1 反映的是超材料在光学透明吸波领域取得的代表性科研成果。本课题组也根据这一研究思路，通过设计和制作了一种基于超材料的光学透明和双波段吸波体，吸波体基本单元由 ITO 十字微结构加补丁结构、无机光学玻璃及 ITO 膜组成，见图 6，厚度为 2 mm 吸波体材料在 8.5 GHz~11 GHz 和 14.5 GHz~16.5 GHz 频率双波段高效吸收电磁波范围内反射率小于 -10 dB。且在可见光区及近红外区透光率达到 70% 以上，且将该技术与宽频电磁屏蔽技术复合设计于一体，广泛应用于屏蔽/吸波功能一体化的光电窗口领域[31]。

对于光学透明吸波材料，在实际设计和应用中，不仅要考虑光学透明特性和吸收带宽，还要考虑结构的厚度和密度，研究者们采用水[32]、空气层[33] [34]或 PMMA [35] [36]代替中间的介电常数较高的玻璃介质基板来解决这一问题。

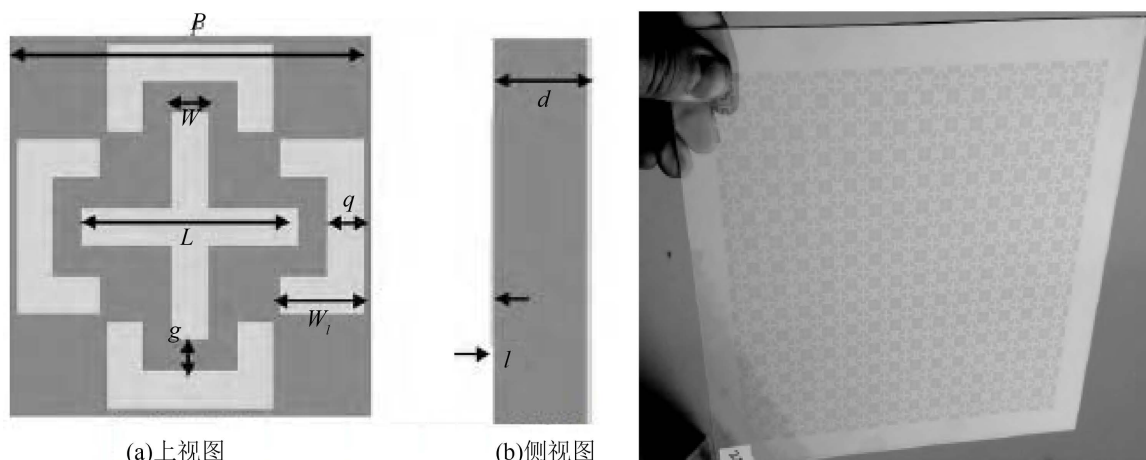


Figure 6. Based on metamaterials of optical transparent and dual-band wave absorber [31]
图 6. 基于超材料的光学透明和双波段吸波体[31]

4. “碳材料”光学透明吸波材料研究

碳纳米光学透明吸波材料包括碳纳米管、石墨烯、C60 等碳族材料为主吸收剂的光学透明薄膜材料。

碳纳米管(CNT)是一种具有特殊结构(径向尺寸为纳米量级, 轴向尺寸为微米量级)的一维纳米材料, 在雷达波吸收领域具有其自身的优势, 碳纳米管透明薄膜吸波理论主要有偶极子振动、纳米尺寸的比表面积大、螺旋结构等。碳纳米管对可见光吸收对应于能带间跃迁; 而对应红外吸收对应于呼吸振动模的激发。纳米材料的吸波特性, 物质的表面效应, 界面效应, 量子效应, 表面原子能造成多重散射, 这是碳纳米管具有吸波特性的主要原因; 宏观量子隧道效应存在使得纳米离子的电子能级分裂, 分裂能级间隔正好处于微波的能量范围内, 这为碳纳米管创造了新的吸波通道。碳纳米管不但具备较高电损耗正切角, 依靠介质的电子极化或界面极化衰减吸收电磁波, 而且还具有较高的磁损耗正切角, 依靠磁滞损耗, 畴壁共振和后效损耗等磁极化衰减吸收电磁波。但是将其应用于光学透明吸波材料领域还有待开展进一步的研究。作者单位研究团队, 采用 CVD 法定向生长的碳纳米管拉丝成膜制备的碳纳米管透明吸波材料, 附着于玻璃基底表面, 单层 CNT 薄膜厚度 5 nm~8 nm, 制备的三层碳纳米管吸波体雷达波反射率 ≥ -10 dB (8 GHz~12 GHz), 可见光透过率为 71.9%, 见图 7。

石墨烯薄膜具有优良的导电性和极高的透光率可设计特性, 成为光学透明吸波材料研究的新材料之一。2014 年, B. Wu 等人首次提出基于石墨烯的透明吸波器[37]。将 5 层 CVD 石墨烯和 1.1 mm 厚的石英玻璃逐层叠加起来, 实现了 125 GHz~165 GHz 频率 90% 以上的吸收, 具有较高的可见光透过率。基于石墨烯薄膜的高透光率和微波损耗特性, 设计并验证了一种超薄透明宽带毫米波吸波器, 工作频段覆盖 18 GHz~40 GHz, 吸波率达 90%, 透光率大于 60%, 厚度为 1.5 mm, 可应用于透明部件的电磁隐身与防护。M. GRANDE 等人[38]基于 Salisbury 屏的原理使用两层不同阻值的石墨烯夹着透明无机玻璃介质层获得透明吸波体, 在 3.6 mm 的厚度下实现了在 8.5~9.5 GHz 频段内 80% 以上的吸收。可见光透过率大于 80%。

5. “导电聚合物”光学透明吸波材料研究

透明导电高聚物吸波材料的研究透明高聚合物是现代战机座舱中透明件的主要材料, 属于绝缘体, 但是通过掺杂或者化学合成等手段, 使其具有导电功能, 并能满足自由电子吸收最大等离子体波长小于雷达波波长。由于大多数雷达波吸收剂是不透明的, 为了得到可见光透明, 红外高反射, 对雷达波强吸

收, 选择掺杂剂和掺杂浓度从而控制其体系中的载流子浓度是关键, 这样才能保证雷达波进入基体后与载流子碰撞而消耗掉, 达到降低雷达波反射率的目的。

在 1977 年日本的 H. Shirakawa 在聚乙炔中掺杂 I_2 发现了聚合物的导电现象, 从此为 TCF 的研究开辟了新的研究空间—由传统的无机物研究拓展到有机物领域。据报道, 美国已经将 C_{60} 在强极化场中酸洗处理制取具有雷达波吸收功能的氰酸盐并须并与 PAn 混合分散悬浮在聚氨酯或其他透明聚合物中, 能制成隐身功能与工艺性兼具的 TCF 涂层, 有可能成为先进战斗机座舱透明件配套使用的 RAMs [39]。

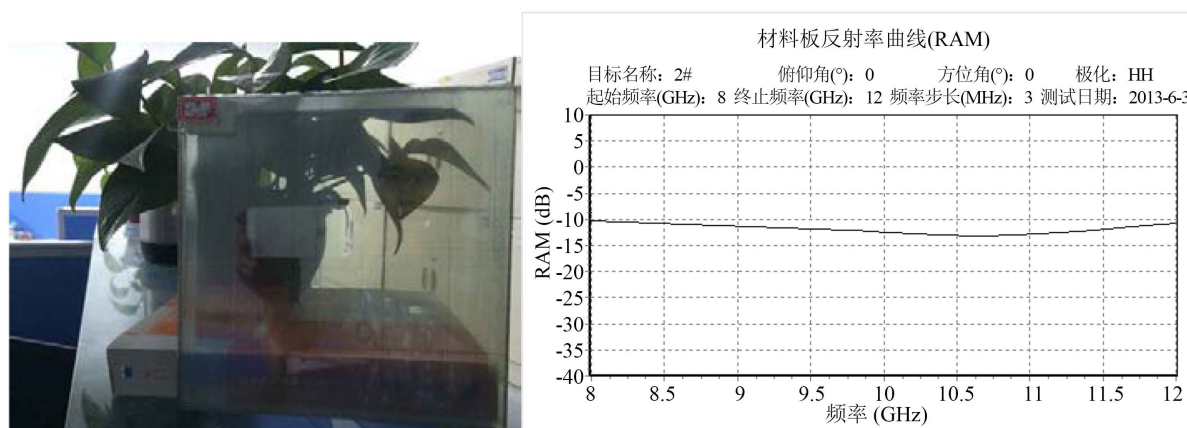


Figure 7. Based on carbon nanotube of optical transparent wave absorber
图 7. 基于碳纳米管的光学透明吸波体

6. 可调光学透明吸波材料研究进展

基于 TCO 导电膜超材料和石墨烯表面电导率的动态调控特性, 结合硅基衬底和外部偏置电路的研究思路, 研究学者积极开展可调光学透明吸波材料研究。

2017 年, Da Yi 等人[40]采用石墨烯蚀刻成方形的周期阵列全透明的材料, 见图 8, 将电解质填充到不同层的石墨烯中间, 实现了吸波率的可调, 同时具有可见光的透过率较高, 可在 13 GHz 附近实现带宽 1 GHz 的收率大于 90%的吸波效果。

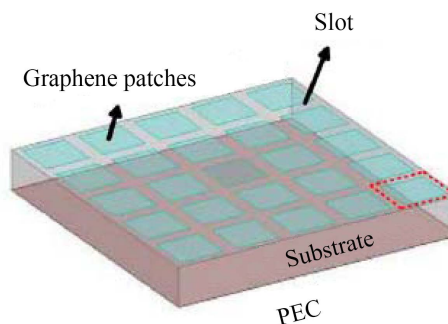


Figure 8. Based on graphene of narrow band transparent wave absorber [40]
图 8. 基于石墨烯的窄带透明吸波器[40]

王越[41]等人基于石墨烯设计了一种多功能超材料吸波体, 通过改变介质层的厚度、偏置电压实现了频率和振幅可调的功能, 中心频率范围 84 GHz~67 GHz, 吸收强度 50%~97%之间变化, 该吸波体在保证

高吸收率的前提下还具有可见光透明、振幅可调、极化不敏感和入射角度不敏感的特性,该超材料吸波体不仅具有超高的电磁波吸收率,并且具有可见光透明和振幅可调的功能,在隐身、探测和通信等领域具有潜在的应用价值。邹楠[42]等人提出了一种液体注入式透明可调吸波结构,通过改变液体注入种类和注入方式可对结构颜色、温度和电磁波的反射率进行调控。本文主要通过仿真方法研究了液体介质注入种类和注入方式对结构电磁波的反射率的影响。仿真结果表明,吸波结构可在 5~18 GHz 频带内达到小于 -10 dB 的反射率,在该频带内还可实现 10 dB 动态范围内反射率大幅调控,并且由于结构的对称性,在入射角度为 45°以内都有较好的稳定性。吴杨慧[43]使用透明导电材料氧化铟锡(ITO)设计并制备了厚度为 10.25 mm、吸收频带在 2.0~5.2 GHz 的低频透明宽带吸波器,该透明柔性宽带微波吸波器精确覆盖了常用的 WiFi 频段,可有效减小移动电子设备等常见干扰源对飞机造成的电磁干扰。

7. 光学透明吸波材料未来发展方向

随着多波段雷达探测技术的日益先进,对光学透明吸波材料的要求越来越高,不仅要求吸波材料“薄、轻、宽、强”,而且要求“智能化”,传统的导电膜、超材料、碳材料和导电聚合物光学透明吸波材料,难以满足日益变化的应用需求,未来主要在以下几个方面开展进一步的研究:

1) 战机座舱、舰船舷窗、建筑物玻璃等领域的应用提出吸波带宽大于 10 GHz,透光率大于 80% 的要求。目前研究的光学透明吸波材料透光率高的其吸收带宽比较窄,而吸收带宽较宽透光率又不高,是由于使用多层结构拓展吸波带宽,是以牺牲可见光透过率为代价的。也就是说光学透明吸波材料是无法实现宽带吸收和高可见光透过率之间的完美兼容。立体超材料能够充分利用空间的耦合机制,相比于平面型超材料结构,立体超材料在实现宽带吸收和高可见光透过率的兼容方面具有天然的优势,有望在单层的情况下实现更宽的吸收带宽,但是立体超材料设计难度较大,制备工艺更苛刻,是我国未来发展高性能光学透明吸波材料的主要方向之一。

2) 在对无线通信系统中微波毫米波器件的众多要求中,透明与吸波可调控这两个需求显得至关重要。与常用的有源器件 + ITO 透明薄膜基超材料技术相比,有源器件 + 石墨烯薄膜基超材料通过谐振损耗吸收可调技术实现超薄、宽频、轻质和强吸收效果,有源器件 + 石墨烯薄膜基超材料是我国微波器件领域未来发展“智能化”、“自适应”光学透明吸波材料的主要方向之一。

3) 以电路模拟、手征媒质、等离子体、智能相变等新技术与光学透明吸波材料多功能复合材料在未来军事领域从雷达、红外和光学等单一功能向高透光、宽频段,高吸收集成电磁波屏蔽等多功能全频段综合集成方向是发展方向;耐候性,寿命长等实用性强是光学透明吸波材料是应用方向发展。

参考文献

- [1] 杨盟,刁训刚,孙裔,等. 氧化铟锡(ITO)薄膜的透明吸波特性研究[J]. 功能材料与器件学报, 2006, 12(5): 465-468.
- [2] 李世涛,乔学亮,陈建国,等. 透明导电薄膜(TCF)的吸波机理及应用研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 6-12.
- [3] Kurihara, H., Hirai, Y., Takizawa, K., *et al.* (2005) An Improvement of Communication Environment for ETC System by Using Transparent EM Wave Absorber. *IEICE Transactions on Electronics*, **88**, 2350-2357. <https://doi.org/10.1093/ietele/e88-c.12.2350>
- [4] Okano, Y., Ogino, S. and Ishikawa, K. (2015) Development of Optically Transparent Ultrathin Microwave Absorber for Suppression of Misidentification Possibility of UHF-RFID System. *Electronics and Communications in Japan*, **98**, 36-46. <https://doi.org/10.1002/ecj.11620>
- [5] Takizawa, K. and Hashimoto, O. (1999) Transparent Wave Absorber Using Resistive Thin Film at V-Band Frequency. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 1137-1141. <https://doi.org/10.1109/22.775450>
- [6] Emerson, W.H. (1973) Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers through the Years. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **21**, 484-490. <https://doi.org/10.1109/TAP.1973.1140517>

- [7] Knott, E.F., Schaeffer, J.F. and Tuly, M.T. (1985) Radar Cross Section, Its Prediction, Measurement and Reduction. Artech House, London.
- [8] Fante, R.L. and McCormack, M.T. (1988) Reflection Properties of the Salisbury Screen. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **36**, 1443-1454. <https://doi.org/10.1109/8.8632>
- [9] du Toit, L.J. (1994) The Design of Jaumann Absorbers. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **36**, 17-25. <https://doi.org/10.1109/74.370526>
- [10] Knott, E.F. and Lunden, C.D. (1995) The Two Sheet Capacitive Jaumann Absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **43**, 1339-1343. <https://doi.org/10.1109/8.475112>
- [11] 邢丽英, 刘俊能. 电阻渐变型结构吸波材料的研究与发展[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 187-191.
- [12] 李世涛, 乔学亮, 陈建国. 透明导电薄膜的研究现状及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(7): 53-59.
- [13] Kim, S.-S., Yoon, Y.-C. and Kim, K.-H. (2003) Electromagnetic Wave Absorbing Properties of High-Permittivity Ferroelectrics Coated with ITO Thin Films of 377 Ω . *Journal of Electroceramics*, **10**, 95-101. <https://doi.org/10.1023/A:1025691621778>
- [14] 李世涛, 乔学亮, 陈建国. 卫星多功能激光防护膜层的研究[J]. 激光杂志, 2005, 36(4): 9-10.
- [15] Du Toit, L.J. (1994) The Design of Jauman Absorbers. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **36**, 17-25. <https://doi.org/10.1109/74.370526>
- [16] Takizawa, K., Hashimoto, O. and Abe, T. (1998) Transparent Wave Absorber Using Resistive Film. *Electronics Letters*, **34**, 347-349. <https://doi.org/10.1049/el:19980348>
- [17] Yi, D., Wei, X.-C., Lin, S.-S., et al. (2015) Transparent Microwave Absorber Based on Single Layer Graphene Film. *IEEE Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Nanjing, 6-9 December 2015, 1-3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413318>
- [18] Haruta, M., Wada, K. and Hashimoto, O. (2000) Wideband Wave Absorber at X Frequency Band Using Transparent Resistive Film. *Microwave and Optical Technology Letters*, **24**, 223-226. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2760\(20000220\)24:4<223::AID-MOP4>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2760(20000220)24:4<223::AID-MOP4>3.0.CO;2-T)
- [19] Soh, T., Kondo, A., Toyota, M. and Hashimoto, O. (2003) A Basic Study of Millimeter-Wave Absorber for Two Frequency Bands Using Transparent Resistive Films. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 1, 149-154.
- [20] Takizawa, K. and Hashimoto, O. (1999) Transparent Wave Absorber Using Resistive Thin Film V-Band Frequency. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 1137-1141. <https://doi.org/10.1109/22.775450>
- [21] Hashimoto, O., Abe, T., Satake, R., Kaneko, M. and Hashimoto, Y. (1995) Design and Manufacturing of Resistive-Sheet Type Wave Absorber at 60 GHz Frequency Band. *The IEICE Transactions on Communications*, **E78-B**, 246-252.
- [22] Takizawa, K., Hashimoto, O. and Abe, T. (1998) Transparent Wave Absorber Using Resistive Film. *Electronics Letters*, **34**, 347-349. <https://doi.org/10.1049/el:19980348>
- [23] Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., et al. (2008) Perfect Metamaterial Absorber. *Physical Review Letters*, **100**, Article ID: 207402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- [24] 李小秋, 冯晓国, 高劲松. 光学透明频率选择表面的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(5): 3193-3197.
- [25] D'Amore, M., De Santis, V. and Feliziani, M. (2012) Equivalent Circuit Modeling of Frequency-Selective Surfaces Based on Nanostructured Transparent Thin Films. *IEEE Transactions on Magnetics*, **12**, 703-706. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2171922>
- [26] Okano, Y. and Ogins, S. (2012) Development of Optically Transparent Ultrathin Microwave Absorber for Ultra-high-Frequency RF Identification System. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **60**, 2456-2464. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2202680>
- [27] Jang, T., Youn, H., Shin, Y.J., et al. (2014) Transparent and Flexible Polarization-Independent Microwave Broadband Absorber. *ACS Photonics*, **1**, 279-284. <https://doi.org/10.1021/ph400172u>
- [28] Hong, I.P. (2015) Transparent Electromagnetic Absorber for Stable Angle of Incidence. *Microwave and Optical Technology Letters*, **57**, 2023-2025. <https://doi.org/10.1002/mop.29249>
- [29] Hu, D.W., Cao, J., Li, W., et al. (2017) Optically Transparent Broadband Microwave Absorption Metamaterial by Standing-Up Closed-Ring Resonators. *Advanced Optical Materials*, **5**, Article ID: 1700109. <https://doi.org/10.1002/adom.201700109>
- [30] 徐翠莲, 孟跃宇, 王甲富, 闫明宝, 王雯洁, 蒋进明, 屈绍波. 光学透明红外与雷达兼容隐身复合超表面[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0416001.

- [31] 周必成, 王东红, 贾巍, 赵亚娟, 李宝毅. 光学透明和双波段吸波超材料的设计与性能[J]. 微波学报, 2016, 32(3): 46-50.
- [32] Shen, Y., Zhang, J.Q., Pang, Y.Q., *et al.* (2018) Transparent Broadband Metamaterial Absorber Enhanced by Water-Substrate Incorporation. *Optics Express*, **26**, 15665-15674. <https://doi.org/10.1364/OE.26.015665>
- [33] Harsh, S., Gaganpreet, S., Saptarshi, G., *et al.* (2019) An Optically Transparent Broadband Microwave Absorber Using Interdigital Capacitance. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, **18**, 113-117. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2882584>
- [34] Harsh, S., Saptarshi, G., Gaganpreet, S., *et al.* (2017) Transparent Broadband Metamaterial Absorber Based on Resistive Films. *Journal of Applied Physics*, **122**, Article ID: 105105. <https://doi.org/10.1063/1.5001511>
- [35] Zhang, C. and Cheng, Q. (2017) Optically Transparent Metamaterial for Broadband Millimeter Wave Absorption. 2017 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), Liverpool, 11-13 September 2017, 1-4. <https://doi.org/10.1109/UCMMT.2017.8068475>
- [36] Zhang, C., Cheng, Q., Yang, J., *et al.* (2017) Broadband Metamaterial for Optical Transparency and Microwave Absorption. *Applied Physics Letters*, **110**, Article ID: 143511. <https://doi.org/10.1063/1.4979543>
- [37] Wu, B., Tuncer, H.M., Naeem, M., *et al.* (2014) Experimental Demonstration of a Transparent Grapheme Millimetre Wave Absorber with 28% Fractional Bandwidth at 140 GHz. *Scientific Reports*, **4**, Article No. 4130. <https://doi.org/10.1038/srep04130>
- [38] Grande, M., Bianco, G., Vincenti, M., *et al.* (2016) Optically Transparent Microwave Screens Based on Engineered Graphene Layers. *Optics Express*, **24**, 22788-22795. <https://doi.org/10.1364/OE.24.022788>
- [39] Glaser, H.J. (2000) Large Area Glass Coating. Von Ardenne Anlagentechnik GMBH, Dresden.
- [40] Yi, D., Wei, X.C. and Xu, Y.L. (2017) Tunable Microwave Absorber Based on Patterned Graphene. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **65**, 2819-2826. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2678501>
- [41] 王越, 王丽, 董连和, 等. 基于石墨烯电光特性的多功能超材料吸波体设计[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2018, 48(4): 047001.
- [42] 邹楠, 易韵, 薛淑云, 李黄炎, 吴文. 一种液控可调透明吸波结构[J]. 微波学报, 2021, 37(5): 73-86.
- [43] 吴杨慧, 王俊杰, 赖森锋, 朱晓波, 顾文华. 用于航空电磁防护和智能隐身的光学透明柔性宽带吸波器的试验研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(5): 70-74.