

不同复合基底旋波介质的吸波特性的研究*

李玉莹 徐晓文 高本庆

(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

刘祖黎 廖海星 姚凯伦

(华中理工大学物理系 武汉 430074)

文 摘 首次制备了不同复合基底的旋波介质,利用网络分析仪对样品进行了测量。实验表明,适当改变基底电导率或适量掺杂铁电、铁磁性物质可有效降低旋波介质的反射率,可有效调节复合手性材料的吸波性能,为研制高效、宽频、轻质的吸波材料提供了切实可行的思路。文中对测量结果进行了定性的分析,并与以非复合材料为基底的旋波介质进行了比较。

关键词 复合基底,反射率,电磁耦合,手性参数

Study on Absorbing Properties of Chiral Medium with Different Composite Host

Li Yuying Xu Xiaowen Gao Benqing

(Electronic Engineering Department, Beijing Institute of Technology Beijing 100081)

Liu Zuli Liao Haixing Yao Kailun

(Phys Department, Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074)

Abstract In this paper chiral materials with different composite host for the first time are prepared and their properties are measured using network analyser. Experimental results indicate that changing conductance of the host or adulteration of magnetic materials in the host can decrease reflectance and adjust absorbing properties of the chiral materials, which offers a feasible method to prepare better absorbing materials. Finally, qualitative analysis of the results and its comparison with that of non-composite host is presented.

Key words Composite host, Reflectance, Electromagnetic coupling, Chiral parameter

1 引言

旋波材料又称手征性材料作为一种新的电磁材料,在吸波材料、天线工程、微波、毫米波器件等领域有着广泛的应用前景。对旋波介质的研究已引起众多科技工作者的重视^[1-4]。对于普通的电磁材料,可通过改变其介电常数 ϵ ,磁导率 μ 及材料厚度来改变其电磁性能,但这大大限制了参量可调范围。而旋波介质多了一个可调节的手性参量,它是由

手性材料的空间非对称性引起的。电磁波入射到旋波介质中时,会在旋波介质中产生由于电场变化而引起的磁偶极矩以及磁场变化而引起的电偶极矩,导致电磁波在旋波介质中的传播特性发生改变,从而改变了旋波介质的电磁性能及吸波性能。

目前,人们在实验上主要采用环氧树脂^[3]、石蜡^[5]为基底的旋波介质,通过改变介质中手性螺旋体的浓度、几何尺寸来改变手性旋波介质材料的性

收稿日期:2000-09-03

*国家自然科学基金资助项目(19775016),国防科工委资助项目(94J10.Z.7.JW0535)

李玉莹,1972年出生,博士研究生,主要从事吸波材料的研制及天线技术的研究工作

能。在理论上有人提出了一种散射模型^[6],并利用该散射模型对不同手性螺旋体浓度、不同手性螺旋体几何尺寸的旋波介质进行了理论计算和分析。为了研究不同复合基底旋波介质的特性,我们首次研制了以聚苯胺复合物为基底的轻质旋波介质,利用微波矢量网络分析仪进行了测量。测量结果表明,改变旋波介质的基底能有效调节旋波介质的吸波性能,利用复合基底制备旋波介质可使旋波介质的吸波性能有明显提高。

2 样品的制备

复合旋波介质板的制备采用轻质高分子导电聚苯胺、聚苯胺与铁氧体的复合物作为基底,与手性螺旋体均匀混合。制备样品分三个系列,其中变化基底聚苯胺的电导率为第一系列,基底聚苯胺的电导率分别为 $3.0 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$ 、 $2.5 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ 、 $4.2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 、 $3.94 \times 10^0 \text{ S/cm}$;以变化基底中 Fe_3O_4 铁氧体与聚苯胺的不同掺杂质量比(20%、25%、30%、35%)为第二系列;以变化基底中 Mn - Zn 铁氧体与聚苯胺的不同掺杂质量比(20%、25%、30%、35%)为第三系列,所有样品的几何尺寸为 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$,厚度为 5 mm 。铁氧体与聚苯胺的复合物采用化学方法复合而成。将金属铜线小螺旋体加入基底中,使整个样品具有手性。金属螺旋体又称旋波体。金属铜线螺旋体的几何尺寸为:铜线直径 0.24 mm ,螺径 0.5 mm ,螺距为 0.31 mm ,每个螺旋体为 3 圈,铜线占样品板体积的 3.2%。我们将所制备样品在环境特性研究所利用微波矢量网络分析仪进行了测量。

3 测量结果和分析

对于不同复合基底的旋波介质样品,测量了样品在频段 $8 \text{ GHz} \sim 18 \text{ GHz}$ 的反射率。对手性吸波材料,着重研究其吸波性能,因此本文重点讨论不同复合基底对旋波介质吸波性能的影响。有关旋波介质的电磁参数及其它特性的讨论可参阅文献[7,8]。

图 1 是以不同电导率聚苯胺为基底手性旋波介质的反射率曲线。从图中可见,在低频段($< 12 \text{ GHz}$)随基底聚苯胺电导率的增加,反射率随基底聚苯胺电导率的增加先减小后增大。从图中还可看出,在频段 $8 \text{ GHz} \sim 14 \text{ GHz}$ 内,四块样品的反射率随频率的变化趋势基本相同,在频段 $14 \text{ GHz} \sim 16 \text{ GHz}$ 内,反射率随频率的变化趋势较为复杂。在 16.4

$\text{GHz} \sim 18 \text{ GHz}$ 频段内反射率随基底聚苯胺电导率的增加而减小。综合考虑低频段和高频段,基底电导率为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 的样品在整个工作频段内对电磁波的吸收效果最好。当基底电导率 $< 4.2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 时,手性旋波介质的反射率随基底电导率的增加而减小。当基底电导率 $> 4.2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 时,手性旋波介质的反射率随基底电导率的增加而增大。以上结果说明改变基底的电导率可以用来调节复合旋波介质对电磁波的吸收性能。

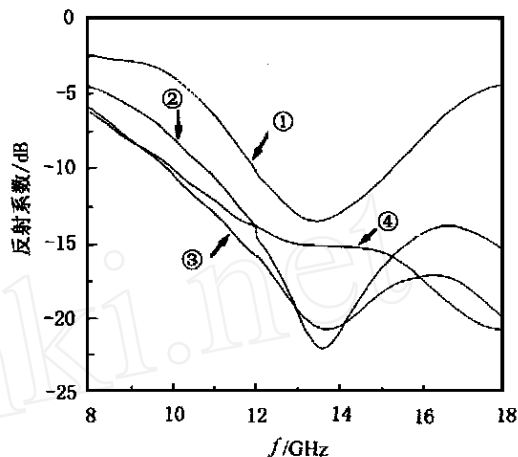


图 1 不同电导率基底手性材料反射系数

Fig. 1 Reflectance of chiral materials with different conductive host

$-3.0 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$; $-2.5 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$;
 $-4.2 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$; $-3.94 \times 10^0 \text{ S/cm}$.

基底中掺杂不同比例 Fe_3O_4 铁氧体手性材料的反射系数见图 2。图 2 表明基底中 Fe_3O_4 铁氧体质量分数从 20%到 35%变化为系列的一组样品。对该系列样品,反射率随 Fe_3O_4 铁氧体含量的增加变化趋势为先减小后增加,在掺杂比为 25%时样品的吸收性能最好,其它样品的反射率均大于掺杂比为 25%时样品的反射率。在频段 $8 \text{ GHz} \sim 10 \text{ GHz}$ 内,即低频段,掺杂比为 25%的样品反射率明显小于其他样品的反射率。在频段 $16 \text{ GHz} \sim 18 \text{ GHz}$ 内,即高频段,掺杂比为 25%的样品反射率同样明显小于其他样品的反射率。这表明在 25%~30%之间,该系列样品对电磁波的吸收有一临界点。在该临界点上样品对电磁波的吸收性能达到最好。图中还表明样品对电磁波的吸收峰值随基底中 Fe_3O_4 铁氧体与聚苯胺的掺杂质量比增加而加大,且向高频端移动。

从以上结果看出,基底中 Fe_3O_4 铁氧体含量为 25 % 的吸波性能在该系列样品中最好。以上结果表明 Fe_3O_4 铁氧体在基底中的含量可以作为调节复合手性介质吸波性能的一种有效手段。

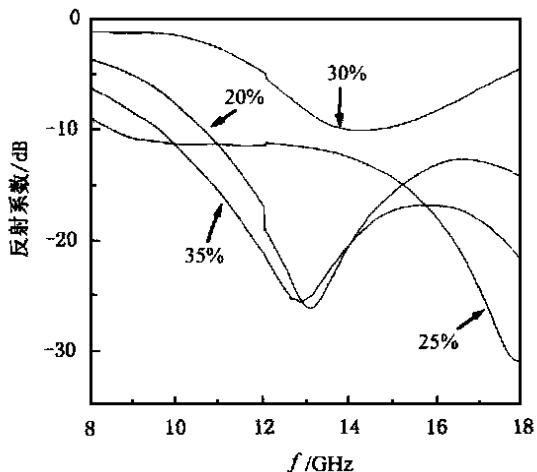


图 2 基底中掺杂不同比例 Fe_3O_4 铁氧体手性材料的反射系数

Fig. 2 Reflectance of chiral materials with different adulteration of Fe_3O_4 ferrite in host

图 3 反映了基底中 Mn - Zn 铁氧体掺杂质量比从 20 % 到 35 % 变化为系列的手性材料的反射系数变化。

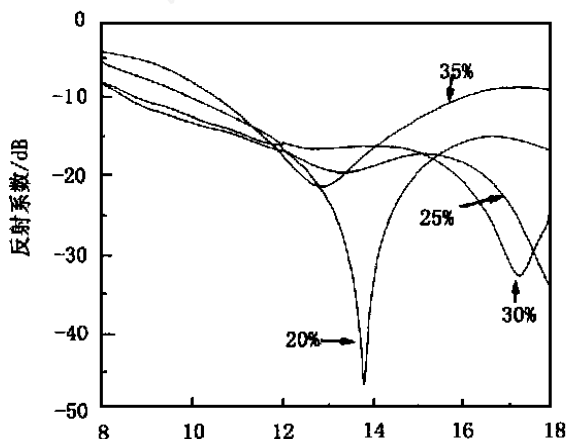


图 3 基底中掺杂不同比例 Mn - Zn 铁氧体手性材料的反射系数

Fig. 3 Reflectance of chiral materials with different adulteration of Mn - Zn ferrite in host

由图 3 可见,随基底中 Mn - Zn 铁氧体与聚苯胺的掺杂质量比的增大,样品对电磁波的 - 8dB 吸

收带宽随之加大,吸收峰值却随之而减小。这就是说,吸收带宽的加宽是以降低吸收峰值为代价的。从设计材料的角度来看,这一方法可取。从图中还可看出,无论在低频段或高频段,样品对电磁波的反射率随 Mn - Zn 铁氧体含量的增加变化趋势为先减小后增加。在掺杂比 25 % 30 % 之间,样品对电磁波吸波有一最佳点。基底中 Mn - Zn 铁氧体含量为 35 % 的样品与其它三块样品相比,吸收峰值明显减小。综合考虑吸收峰值和吸收频带宽度,可以得出该组样品中,掺杂质量比为 30 % 的样品吸波性能最好。以上结果表明 Mn - Zn 铁氧体在基底中的含量也能有效调节手性介质的吸波性能。

由以上结果可以看出,改变旋波介质的基底可有效调节其吸波性能。从以上讨论中,我们得出,改变基底的电导率及基底中铁氧体的质量分数均可作为调节旋波介质吸波性能的一种手段。无论是改变基底的电导率,或者改变基底中铁氧体的质量分数都有一最佳临界点。在该临界点上,旋波介质对电磁波的吸收达到最好。因此,在设计和制备吸波材料时,应考虑基底变化对材料吸波性能的影响。

对于我们所得到的测量结果及总结得出的结论,我们可以利用复合旋波介质中的耦合机制来解释。在手性旋波介质内部存在着手性螺旋体之间的耦合以及手性螺旋体与基体之间的耦合。首先,手性螺旋体之间的耦合是由于螺旋体的空间非对称性引起。由于手性螺旋体的加入,使得整个介质板具有了手性。电磁波入射到手性介质内部,由于螺旋体的空间非对称性,会在螺旋体上产生由于电场时变性而引起的磁偶极矩以及由于磁场时变性而引起的电偶极矩。电偶极矩和磁偶极矩之间的相互作用导致了螺旋体之间的耦合。此外,手性螺旋体加入到非手性介质中时,使做为基体的非手性介质也具有了手性,因而,手性螺旋体与基体之间也存在着由于螺旋体的空间非对称性引起的电磁耦合。手性螺旋体之间的耦合以及手性螺旋体与基体之间的耦合会在金属螺旋体上产生耦合电容,耦合电感,耦合阻抗。这些耦合量与手性螺旋体几何尺寸以及基体的电磁特性有关。对于不同电磁特性的基体,手性螺旋体与基体之间的耦合会相应改变,耦合电容,耦合电感及耦合阻抗也会发生相应的改变。这种改变直接影响到材料对电磁波的吸收及材料的电磁参量。

在具体实验中,我们采用改变基底电导率为第一系列样品。基底电导率的改变,意味着电磁波在复合手性材料中衰减速度的改变。手性螺旋体之间的耦合及手性螺旋体与基体之间的耦合所产生的磁偶极矩和电偶极矩随基底电导率的改变相应地增强或减弱。随基底电导率的增加,由耦合产生的电偶极矩和磁偶极矩在螺旋体上激发的电流会迅速衰减。手性螺旋体之间的耦合及手性螺旋体与基体之间的耦合因电流的迅速衰减变得更加强烈。这种作用的结果使电磁波在复合手性材料中被迅速吸收从而使复合手性材料表现出良好的吸波性能。第二系列样品中,我们改变了基底中 Fe_3O_4 铁氧体的质量分数。 Fe_3O_4 铁氧体是一种无机铁电物质,具有较高的介电系数。 Fe_3O_4 铁氧体在基底中的改变使得复合手性材料的电磁参量相应改变。基底中 Fe_3O_4 铁氧体含量的增加,使复合手性材料的介电系数得以提高。因此提高了电磁波在复合手性材料内部的介电损耗,加速了电磁波在复合手性材料内部的衰减。另外,金属螺旋体上产生的耦合电容,耦合电感随基底介电系数的增加而增大。这样复合手性材料对电磁波的吸收进一步加强。从我们所得到的实验曲线中可以看出随基底中 Fe_3O_4 铁氧体含量的增加,复合手性材料的介电系数增大,手性材料对电磁波的吸收加强。但是复合手性材料基底中 Fe_3O_4 铁氧体含量应当适量,即 Fe_3O_4 铁氧体在基底中的含量存在一个临界点。高于或低于这个临界点都会使复合手性材料表现出较差的吸波性能。在我们所做的实验中,我们得出 Fe_3O_4 铁氧体掺杂比为 25% 的复合手性材料吸波性最好,在该掺杂比附近有一临界匹配点。

同样在第三系列样品中,我们通过改变基底中 Mn - Zn 铁氧体的含量来调节复合手性材料的性能。Mn - Zn 铁氧体是一种无机磁性材料,它具有较大的磁导率 μ 。它的加入使复合手性材料的磁损耗增强。金属螺旋体上产生的耦合电容,耦合电感随基底磁导率 μ 的增加而增大。这样通过调节基底中 Mn - Zn 铁氧体的含量使复合手性材料的吸波性能得以增强。在具体实验中,我们使 Mn - Zn 铁氧体

在基底中的含量从 20% 到 35% 之间变动。我们得出,在 30% 掺杂比附近有一临界点。Mn - Zn 铁氧体在基底中的含量小于和大于该临界点时,复合手性材料的吸波性减弱。这说明 Mn - Zn 铁氧体在基体中的含量要适当。

4 结论

从实验结果及分析中看出,改变复合手性材料的基底电导率以及基底中铁电、铁磁性物质的含量都可作为调节复合手性材料吸波性能的一种手段。适当改变基底电导率或掺杂铁电、铁磁性物质可有效降低复合手性材料的反射率。改变基底性能是继通过改变手性螺旋体之后又一种用来调节复合手性材料的吸波性能的有效途径。且我们所使用的基底是轻质高分子化合物聚苯胺,易于制备。因此通过改变基底性能来调节复合手性材料的吸波性能是切实可行的方法,为研制高效、宽频、轻质的吸波材料提供了切实可行的思路。

参考文献

- 1 Winkler M N. An experimental investigation of some models for optical activity. J. Phys. Chem. ,1956:1 656 ~ 1 659
- 2 Varadan V V, Ro R, Varadan V K. Measurement of the electromagnetic properties of chiral composite materials in 8 - 40GHz range. Radio Science ,1994;29:9 ~ 22
- 3 Guire T, Varadan V V, Varadan V K. Influence of chirality on reflection of EM waves by planar dielectric slab. IEEE. Trans. Electroman. Compat. ,1990;32:300 ~ 303
- 4 Sun G C, Yao K L, Liu Z L, Huang Q L. A study on measuring the electromagnetic parameters of chiral materials. J. Physics D: Applied Physics ,1998;31(17):2 109 ~ 2 111
- 5 李玉莹,刘祖黎,潘华锦. 不同螺旋体浓度旋波介质吸波性能的研究. 宇航材料工艺,2000;30(1):46 ~ 49
- 6 Alfred J B, Karl R C. An approximate model for artificial chiral material. IEEE. Trans. on Antennas & Propagation,1994;42(12):1 592 ~ 1 598
- 7 李玉莹,刘祖黎,潘华锦等. Mn - Zn 铁氧体聚苯胺复合旋波介质的特性研究. 华中理工大学学报,1998;26(3):16 ~ 18
- 8 李玉莹. 复合手性吸波材料的研制和特性研究. 华中理工大学硕士学位论文,1999