

文章编号: 2095-4980(2021)02-0291-05

## 混合粉末加载对隔离滤波器性能的影响实验

蔡丹黎<sup>1</sup>, 彭川<sup>1</sup>, 戚思遥<sup>1</sup>, 刘尧<sup>1</sup>, 赵朝霞<sup>1</sup>, 赖超<sup>1</sup>, 张益<sup>\*1</sup>, 朱明敏<sup>2,3</sup>, 黄卡玛<sup>1</sup>

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065; 2.中国计量大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310018;  
3.浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 粉末材料的微波耗散机理不同于块状材料, 非磁性的金属与氧化物混合粉末展现出对微波磁场较强的吸收特性。本文针对金属与氧化物混合粉末的电导率和微波磁吸收特性开展研究, 并利用特定比例的混合粉末加载基于静磁表面波的隔离滤波器, 研究其对非互易滤波器的隔离度和插入损耗的影响。实验结果表明: 30%Cu+70%CuO 的混合粉末电导率为 217.435 mS/m, 对微波磁场具有较好的吸收特性; 利用此混合粉末加载非互易滤波器后, 插入损耗减小, 隔离度获得了明显提升, 达到了 21.56 dB。

**关键词:** 金属氧化物粉末; 铁氧体; 带通滤波器; 隔离度

**中图分类号:** TN713<sup>+</sup>.5; TN627

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020573

## Influence of mixed powder on performance of isolating bandpass filter

CAI Danli<sup>1</sup>, PENG Chuan<sup>1</sup>, QI Siyao<sup>1</sup>, LIU Yao<sup>1</sup>, ZHAO Zhaoxia<sup>1</sup>, LAI Chao<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>\*1</sup>,  
ZHU Mingmin<sup>2,3</sup>, HUANG Kama<sup>1</sup>

(1.School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;

2.College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

3.Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** The microwave dissipation mechanism of powder materials is different from that of bulk materials. The mixed powder of non-magnetic metal and oxide show strong absorption on microwave magnetic field. Researches which focus on the electrical conductivity and microwave magnetic absorption characteristics of the mixed powders are carried out. Samples of the mixed powders are loaded to the isolating bandpass filter which is achieved with magnetostatic surface wave, in order to study their effects on the isolation and insertion loss of non-reciprocal filter. The experimental results show that: the 30%Cu+70%CuO mixed powder sample with conductivity of 217.435 mS/m has strong absorption on the microwave magnetic field; after loading this mixed powder sample to the non-reciprocal filter, the insertion loss is reduced and the isolation is significantly increased to 21.56 dB.

**Keywords:** metal oxide powder; ferrite; bandpass filter; isolation

射频/微波系统朝着小型化、集成化的方向发展<sup>[1-2]</sup>, 为了消除带外噪声和干扰频谱分量, 微波系统对具有选频特性的滤波器需求增加<sup>[3-4]</sup>。同时, 隔离器是微波系统中另一重要的组成部分<sup>[5-6]</sup>。但这两类器件却通常作为分立元件存在于系统中, 造成系统插入损耗高, 体积大, 成本高等问题。因此, 结合了带通滤波器和隔离器性能的新型非互易器件不仅可以提升系统性能, 还有利于实现紧凑、低成本的射频通信系统。为此, 需要深入地探索滤波器与隔离器的一体化设计方法。

在射频微波系统中, 隔离通常使用铁氧体材料来实现, 但在之前的研究中, 大多数使用铁氧体材料的滤波器存在插入损耗大或非互易性等问题, 不能实现集成带通滤波和隔离的功能<sup>[7-8]</sup>。另一方面, 已有研究表明: 非磁性金属和氧化物的混合粉末材料对微波磁场有良好的吸收特性<sup>[9]</sup>, 在铁氧体材料表面加载该混合粉末材料

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2021-01-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61901286); 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室开放课题基金资助项目(2020KF0002)

作者简介: 蔡丹黎(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为铁氧体滤波器。email:danc4112@qq.com

\*通信作者: 张益 email:yizhang\_ee@163.com

不会影响铁氧体材料的磁性参数。为此,利用该混合粉末加载的铁氧体非互易滤波器,将有望在不影响滤波器插入损耗等参数的条件下,增加其隔离度。

本文选择  $\text{Cu}+\text{CuO}$  的混合粉末体系来研究混合粉末材料的电导率以及其对微波磁场的吸收效果,系统地测量了混合粉末材料的电导率,并利用微波单模腔测量了加载不同混合粉末材料时的  $S$  参数。同时利用钇铁石榴石铁氧体(Yttrium Iron Garnet ferrite, YIG)材料加载到平行微带线上,实现了基于静磁表面波的非互易滤波器;之后,进一步研究了混合粉末材料加载对该隔离滤波器的插入损耗和隔离度等参数的影响。

## 1 具有隔离性的磁调谐带通滤波器

该滤波器的结构如图 1 所示,滤波器中的微带线结构使用厚度为 0.3 mm,相对介电常数为 9.8 的 Rogers TMM 10i 介质板制成。微带线长度和宽度分别为 5.6 mm 和 0.4 mm,两根微带线之间距离为 1.2 mm,采用 SSMA 接头侧面馈电。因为隔离度是通过激发不同方向的静磁波在铁氧体材料的上下表面传播,从而使上下表面具有不同的阻抗特性而获得,因此将铁氧体放置于微带线平面上方并旋转  $45^\circ$ ,添加一个平行于  $x$  轴方向的外加偏置磁场,可以实现带有隔离特性的滤波功能<sup>[10]</sup>。滤波器的主要结构参数如表 1 所示。

采用基于有限单元法的数值仿真软件对  $45^\circ$  旋转铁氧体的滤波器进行仿真设计,并利用 Agilent PNA E8262B 矢量网络分析仪对加工的滤波器进行实际测量。仿真和测量结果如图 2 所示,从图中可以看出,频率响应具有较好的带通特性并有一定的隔离度,为 18.46 dB;同时,带外抑制小于 -10 dB,仿真中心频率为 3.85 GHz,实际值为 4 GHz。中心频率偏移的原因,可能为铁氧体加工时厚度不均匀造成。同时实际测量插入损耗  $|S_{12}|$  大于仿真结果,为 2.7 dB。

该器件的隔离度主要由铁氧体材料顶层传输的静磁表面波引起。如果在不影响铁氧体材料性质的情况下,将其顶层的静磁表面波磁场吸收,理论上即可提高器件的隔离度。而已有研究表明,混合金属粉末对微波磁场具有较强的吸收特性,且不影响铁氧体材料的性能<sup>[9]</sup>。

## 2 不同比例混合粉末材料性质探究

为研究金属+氧化物的混合粉末对微波磁场的吸收特性,根据文献[11],将混合粉末在研磨钵中充分研磨 15 min 钟及以上,粉末被混合均匀。故本文选用不同比例的,总质量为 1 g 的  $\text{Cu}+\text{CuO}$  粉末,在研磨钵中进行 15 min 以上的充分研磨,然后利用模具压制成药片状样品,利用 HIOKI IM3536 LCR 测试仪,对其电导率进行系统测量。材料电导率如表 2 所示,可以看出,随着 Cu 粉比例的减小,混合粉末材料的电导率也呈现减小趋势,并且在 30%Cu+70%CuO 变化最剧烈,电导率为 0.21 S/m。

利用微波单模腔测量加载不同混合粉末材料的  $S$  参数。为探索混合粉末材料对微波磁场的吸收,选用 TE102 模式的矩形谐振腔,将被测材料放置于谐振腔中心位置,该位置微波磁场强度最大,微波电场强度最小。腔体空载及放入不同比例混合粉末后的  $|S_{11}|$  测量结果如图 3 所示。

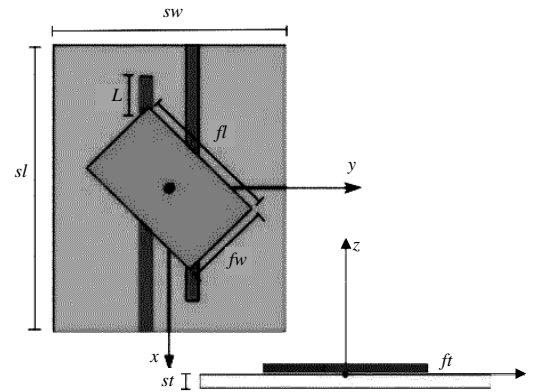


Fig.1 Structure of bandpass filter  
图 1 带通滤波器结构

表 1 滤波器主要结构参数(单位: mm)

$st$	$sw$	$st$	$fl$	$fw$	$ft$	$L$
8.0	6.0	0.4	3.6	2.5	0.3	1.5

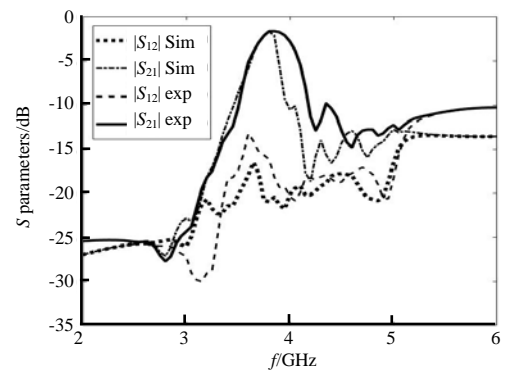


Fig.2 S parameters of simulation and experiment  
图 2 滤波器仿真  $S$  参数与实际测试  $S$  参数

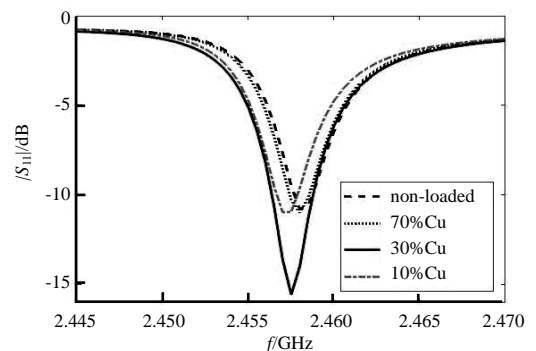


Fig.3 Comparison of magnetic absorption power of materials with various metal copper ratios  
图 3 各个金属铜比例材料对磁场吸收功率比较

表 2 各个比例 Cu+CuO 粉末材料的电导率(单位: S/m)  
Table2 Conductivity of Cu+CuO powder materials in various proportions(unit: S/m)

metal copper ratio	copper block	100%	70%	50%	40%	30%	20%	10%
conductivity	$5.7 \times 10^7$	$1.1 \times 10^6$	$3.6 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$	$6.5 \times 10^4$	0.21	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$

理论上，式(1)表示混合粉末材料中的欧姆损耗，解释了样品在微波磁场中损耗的功率<sup>[9]</sup>：

$$P_c = \frac{3r_c^2}{2r_p^3}(1 - \rho_s) \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_c \omega}{2\sigma_c}} (1 - e^{-2\alpha_c r_c}) \int |\mathbf{H}|^2 dV \quad (1)$$

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{\sigma_c \mu_0 \mu_c \omega}{2}} \quad (2)$$

式中： $r_p$  和  $r_c$  分别为整个粒子和金属核的半径，下标 c 和 p 分别表示金属核和氧化物层； $\rho_s$  为混合粉末材料的孔隙率； $\sigma, \mu$  分别为材料的相对电导率和相对磁导率。混合粉末材料的趋肤深度计算如下：

$$\delta_p = \frac{1}{\alpha_p} \sqrt{\frac{2}{\sigma_p \mu_0 \mu_p \omega}} \quad (3)$$

根据式(1)可得，混合粉末金属和氧化物的比例不同，对微波磁场的损耗有一定影响，可分为两种情况讨论：当金属粉末比例小，氧化物粉末比例大时，金属粉末被氧化物粉末完全包围，可将金属粉末半径  $r_c$  视为定值。此时，随着氧化物粉末比例逐渐升高，氧化物层厚度增加，整个粒子半径  $r_p$  增大，导致  $P_c$  减小；当氧化物粉末比例小，金属粉末比例大时，可将  $r_p$  视为定值，随着金属粉末比例升高，根据文献[12]，此情况下，金属和氧化物混合粉末的电导率提升非常剧烈，通过式(2)得到的趋肤深度将远小于金属粉末半径  $r_c$ ，微波磁场不能渗透混合粉末，导致  $P_c$  迅速减小。即金属粉末和氧化物粉末比例一定时，欧姆损耗功率  $P_c$  有最大值。

通过实际测试结果验证理论推断， $P_c$  值越大，材料对微波磁场的损耗功率越大， $|S_{11}|$  的值越小。如图 3 所示，当放置 30%Cu+70%CuO 混合粉末材料时， $|S_{11}|$  达到 -15 dB，为实验比例中  $|S_{11}|$  的最小值；远小于  $|S_{11}|$  在空载、10%Cu、70%Cu 时的 -10 dB，故 30%Cu+70%CuO 混合粉末材料对微波的磁场吸收功率最大。

### 3 混合粉末材料加载对隔离滤波器性能的影响

为探索混合粉末样品对隔离滤波器性能的影响，将压制的厚度为 1 mm 的混合材料切割成与平面铁氧体一致大小的薄片。将该片放置于滤波器上铁氧体材料的顶层，铁氧体材料底下的平行微带线通过 SSMA 接头连接到矢量网络分析仪，系统的偏置磁场通过电磁铁 PEM-30 提供，并由高斯计测量偏置磁场大小。整个测量系统如图 4 所示。

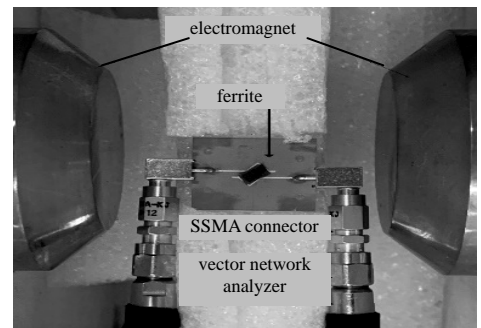
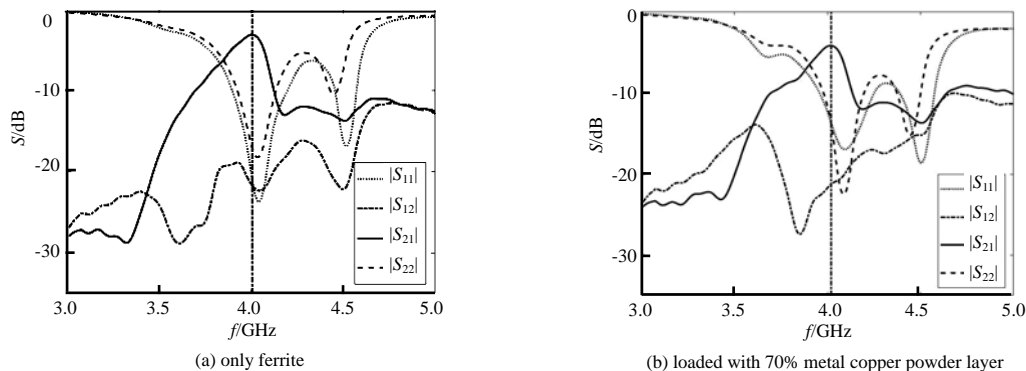


Fig.4 Ferrite filter products  
图 4 加工制作的铁氧体滤波器成品

对比不同混合材料加载下的隔离滤波器的  $S$  参数，如图 5 所示，不同材料的滤波器都呈现带通特性，同时通带频率内回波损耗均小于 -15 dB，并且高频带外抑制均大于 10 dB，满足带通滤波器的设计要求。不同混合粉末加载后滤波器的插入损耗和隔离度如图 6 和表 3 所示，随着加载的混合粉末材料中金属粉末比例逐渐减小，滤波器的插入损耗减小。混合粉末材料加载后，滤波器的隔离度并不随粉末材料中金属粉末含量比例的变化呈单调变化关系，但在 30%Cu+70%CuO 材料时，隔离度最大，为 21.56 dB，可见隔离度大小与材料对磁场的吸收功率有关。



(a) only ferrite

(b) loaded with 70% metal copper powder layer

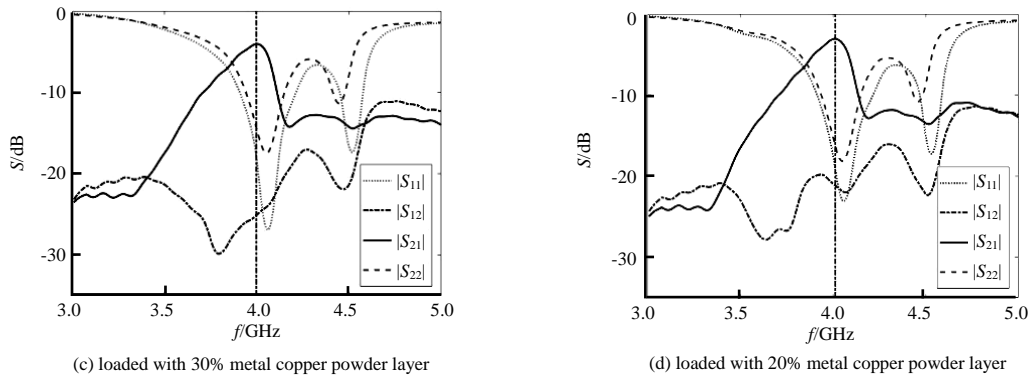


Fig.5 S parameters of filter  
图 5 滤波器 S 参数

表 3 各材料隔离度与插入损耗比较

Table3 Isolation and insertion loss  $S_{21}$

item	ferrite	copper block	metal copper ratio						
			100%	70%	50%	40%	30%	20%	10%
isolation	18.46	18.20	18.70	17.87	18.33	19.0	21.56	17.95	17.88
insertion loss	2.70	3.80	3.87	3.77	3.85	3.84	3.61	2.70	2.69

#### 4 结论

本文探索了不同比例的 Cu+CuO 混合粉末样品的电导率及其对微波磁场的吸收特性，发现混合粉末材料的电导率随金属粉末比例减小而减小，在 30%Cu+70%CuO 比例附近电导率的变化最剧烈，且该混合粉末材料对微波磁场有明显的吸收特性。在此基础上，将该混合粉末样品加载于基于平面铁氧体材料的隔离滤波器，在不影响滤波器插入损耗的条件下，可以将隔离度提高至 21.56 dB。这项实验研究在未来的射频集成电路领域有望得到良好的应用。同时，将开展混合粉末的有限单元法建模仿真研究，进一步探究混合粉末样品的微波损耗机理及应用。

#### 参考文献：

[ 1 ] 董彬虹,李少谦. 短波通信的现状与发展趋势[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2007,5(1):1-5. (DONG Binhong,LI Shaoqian. Current status and development trend of short wave communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2007,5(1):1-5.)

[ 2 ] 邹建宏. 短波通信的现状与发展趋势[J]. 信息与电脑(理论版), 2015(11):88-90. (ZOU Jianhong. Current status and development trend of short-wave communication[J]. Information and Computer(Theoretical Edition), 2015(11):88-90.)

[ 3 ] GOMEZ-GARCIA R,GUYETTE A C. Reconfigurable multi-band microwave filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015,63(4):1294-1307.

[ 4 ] RAMIREZ-VILLEGAS R,HUYNEN I. Configurable microwave filter for signal processing based on arrays of bistable magnetic nanowires[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(1):72-77.

[ 5 ] CHENG Yujian,HUANG Quidong. Narrowband substrate integrated waveguide isolators[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2014,24(10):698-700.

[ 6 ] KAGITA S,BASU A. Electrically tunable ferrite bandpass filter in X-band with wide tunability[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019,55(7):1-4.

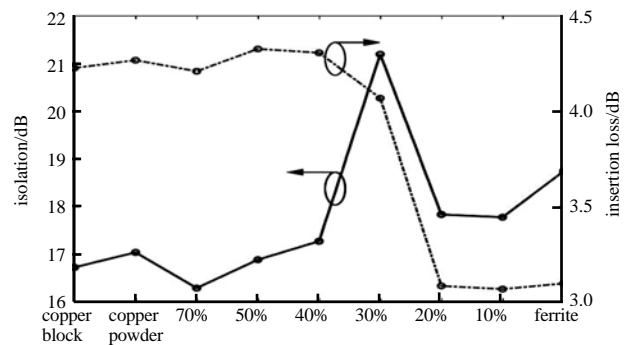


Fig.6 Comparison of isolation and insertion loss of material  
图 6 各材料隔离度与插入损耗比较