

特邀文章

高温超导微波滤波器研究进展*

刘海文¹ 任宝平²

(1. 西安交通大学 信息与通信工程学院,西安 710049; 2. 华东交通大学 信息工程学院,南昌 330013)

摘要: 滤波器作为通信系统射频前端的关键部件,其性能至关重要。在微波频段,高温超导薄膜材料的表面电阻比普通金属铜低两个数量级以上。由于用高温超导体可以制备出性能优异的微波滤波器,并且现代无线通信系统多网络、多制式和多业务以及抗干扰的发展需求,使得小型多频带滤波器和具有抗噪声干扰的平衡滤波器的研究备受关注。研究团队长期从事该领域研究,并已取得一些研究成果。文章从不同谐振器结构类型以及频率特性等方面介绍了多频带和平衡滤波器的研究设计工作。

关键词: 高温超导,多频带,平衡,微波滤波器,抗干扰

Research Progress on High-Temperature Superconducting Microwave Filters

LIU Hai-wen¹, REN Bao-ping²

(1. School of Information and Communication, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: As a key component of the RF front-end of a communication system, the performance of filters is very important. In the microwave frequency band, the surface resistance of the high-temperature superconducting thin film material is more than two orders of magnitude lower than that of ordinary metal copper. Based on the use of high-temperature superconductors, microwave filters with excellent performance can be prepared. Based on the development requirements of multi-network, multi-standard, multi-service, and anti-interference in modern wireless communication systems, research on compact multi-band filters and balanced filters with anti-noise interference has attracted much attention. The research team has long been engaged in research in this field and has achieved some research results. This article will introduce the research and design work of multi-band filters and balanced filters based on different resonator structure types and frequency properties.

Key words: high-temperature superconducting, multi-band, balanced, microwave filter, anti-interference

引言

1911年,荷兰物理学家 Onnes 发现了超导电性,这是20世纪最伟大的科学发现之一^[1]。数十年来,超导体的两个不寻常的特性——零电阻和抗磁性,使其在科学研究、信息通讯、能源存储、交通运输、生物医学等领域具有重大应用。特别在中、美、日等国学者锲而不舍的探索下,突破麦克米兰极限温度这一传统理论,相继在铜氧化物和铁基等超导材料研究方面取得重大进展,将超导转变温度提高到液氮温区,极大地推动了高温超导研究从基础科学向应用技术的发展。随着材料制备工艺和制冷机技术日趋成熟,高温超导薄膜加工成本已大为降低。高温超导材料已在电子对抗、无线通讯、气象雷达、射电天文以及空间技术等领域,取得显著的应用成效^[2]。

高温超导滤波器作为最先取得突破性进展的微波电子器件代表,备受关注。特别是2000年以来,超导滤波器的研究取得了长足的进步,窄带、宽带和多频带等各类型滤波器被相继研究和设计^[3-8]。本

* 收稿日期:2019-12-18

基金项目:国家自然科学基金(U1831201,61728106)

研究团队从 2011 年开始从事超导微波滤波器研究工作,重点研究高温超导多频带微波滤波器和平衡滤波器,用于满足现代无线通信系统对多业务、多功能射频前端的需求和解决高集成度系统模块和通信带来的噪声干扰问题,取得了一系列研究成果^[9-14]。

本文将选取本团队部分工作,介绍高温超导多频带滤波器和平衡滤波器的研究进展,主要包含:基于多模谐振结构的高温超导三频带和四频带微波滤波器研究与设计;基于共用谐振器和双模谐振器的八阶高温超导双频带滤波器研究与设计以及单频带和双频带平衡滤波器研究与设计。

1 高温超导滤波器设计基本原理和流程

根据微波网络理论可知,常规微波滤波器是一个二端口网络器件,通常由多个谐振器按照一定的耦合拓扑排列而成。需要注意的是,第 4 节介绍的平衡滤波器为四端口网络器件,但其输入输出为一对平衡端口,通过经典的奇偶模分析方法可等效为两个二端口网络,且重点关注和设计差模电路。微波滤波器通带内实现信号的传播并在阻带内表现为信号衰减特性,通带特性和阻带特性构成微波滤波器的整体频率响应。滤波器的频率响应可由转移函数表示,也即散射参数 S_{21} 的数学表达。理想情况下,二端口滤波器网络的转移函数为:

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 F_n^2(\Omega)} \tag{1}$$

其中 ε 为波纹系数, $F_n(\Omega)$ 为特征函数, Ω 是频率变量。而滤波器衰减一般定义为:

$$L_A(\Omega) = 10\log \frac{1}{|S_{21}(j\Omega)|^2} \tag{2}$$

对于微波带通滤波器,其常用指标参数主要包括中心频率、频带宽度、波纹系数、插入损耗、回波损耗、带外衰减等。波纹系数用来表示通带内频率响应的平坦度,是通带内响应幅度的最大值与最小值之差,单位为 dB。频带宽度一般为 3 dB 通带宽度,而基于低通原型设计时则用波纹带宽。带外衰减与滤波器的阶数(构成滤波器的谐振器的个数)相关,阶数越高,带外衰减越大;然而,阶数高导致插入损耗也高,普通微带滤波器受限于损耗其阶数一般不超过 6 阶,但超导滤波器可以设计到十几或几十阶,带外衰减可达 100 dB 以上。

当前,高温超导滤波器通常为基于微带结构的平面耦合谐振电路,如图 1 所示,多利用计算机辅助

网络综合法。设计流程一般为:1)确定滤波器技术指标;2)进行理论计算,确定阶数、零点等基本参数;3)综合得出满足要求的耦合矩阵;4)使用电磁仿真软件仿真电路;5)比较仿真和理论计算曲线,优化电路;6)得到最终电路版图。

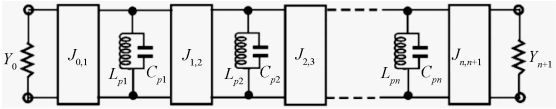


图 1 n 阶耦合谐振器型带通滤波器

通常情况下,在采用电磁仿真软件进行电路仿真时,主要确定两种参数:谐振器间的耦合间距和馈线结构物理尺寸。此时,需对构成滤波器的谐振器的基本耦合模型(耦合系数 M_{ij})和馈电结构(对应外部品质因子 Q_{ex})进行弱耦合参数提取,公式分别如下:

$$M_{ij} = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \tag{3}$$

$$Q_{ex} = \frac{f_0}{\Delta f_{\pm 90^\circ}} \tag{4}$$

其中 f_{p1} 和 f_{p2} 是两个耦合谐振器的耦合分开的低频率和高频率, f_0 是 S_{11} 的峰值频率, $\Delta f_{\pm 90^\circ}$ 为 S_{11} 相位曲线正负 90° 对应的频差。通过比对提取的耦合参数与耦合矩阵理论值,确定耦合间距和馈线尺寸。最终,通过软件优化工具可确定最终电路尺寸。

2 高温超导多模多频带滤波器研究

为满足无线通信多业务、多功能发展需求,开展了高温超导多频带微波滤波器的研究;同时,日益高集成度的通信系统要求微波无源器件小型化设计,其中采用多模谐振器是设计小型多频带滤波器的一种有效方法。

2.1 高温超导三频带滤波器设计

为设计三频带滤波器,本团队提出了一种小型三模谐振器,结构如图 2(a)所示^[9]。如图所示,谐振器为三枝节加载多模谐振结构,可灵活设计三个谐振频率;同时,结构具有对称性,可采用经典的奇偶模分析方法对电路谐振特性简化分析,其奇偶模等效电路如图 2(b)和(c)所示。

基于提出的三模谐振器,通过设计合适的耦合可实现滤波器设计,且每个通带都有两个极点,带宽相对可控,滤波器结构如图 3 所示。如图所示,通过对主谐振器和加载的枝节进行弯折处理,一方面实现了小型化设计,另一方面便于耦合;同时通过在输

入馈线和输出馈线加入绿色弯折微带线,实现了源负耦合,可产生一对传输零点,提高通带选择性和带外衰减。

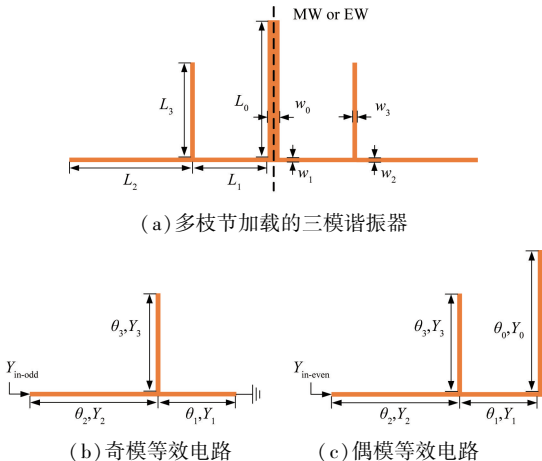


图 2 三模谐振器结构及其奇偶模等效电路

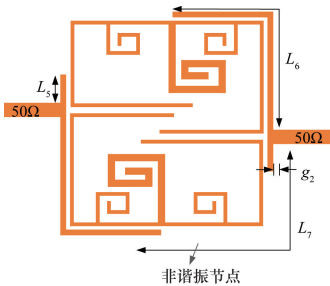


图 3 基于三模谐振器的高温超导三频带滤波器

通过仿真优化,可得到最终仿真结果,如图 4 蓝色实线所示。仿真软件为 Sonnet(下同),介质基板为 MgO,介电常数为 9.78,基板厚度为 0.5 mm。电路加工后在 77 K 低温下对滤波器进行测试,测试结果如图 4 红色虚线所示。超导薄膜使用的是工艺线成熟的 YBCO(下同),为 2 英寸晶元。测试结果显示三个通带的最大插入损耗为 0.22 dB,远大于基于普通铜覆介质基板的滤波电路损耗。

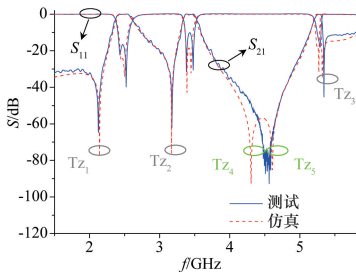


图 4 高温超导三频带滤波器仿真测试结果

2.2 高温超导四频带滤波器设计

在三频带滤波器基础上,我们又设计了一款四频带滤波器,为此提出了一款新型的四模环形加载谐振器结构^[10],其传输线模型如图 5(a)所示。弱

耦合激励下,得到单个谐振器的频率响应,如图 5(b)所示。据图可见,谐振器可以提供四个谐振模式,分别用于构建四个频带。由于谐振器也是对称结构,同样可采用奇偶模方法对电路进行简化处理并推导频率公式。

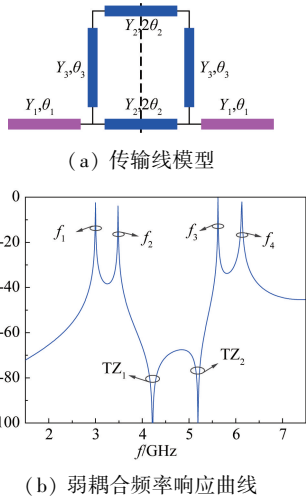


图 5 四模环形加载谐振器传输线模型及弱耦合频率响应曲线

在四模环形加载谐振器的基础上,研究团队设计了一款高温超导四频带滤波器,结构如图 6(a)所示。为小型化目的,对谐振器进行了弯折处理,同时,为增加设计自由度,研究团队采用了弯折线慢波结构,实现了非线性频率调控。图 6(b)给出了四频带滤波器的耦合拓扑图,可知有信号通道,每个通道单独设计,互不干扰。

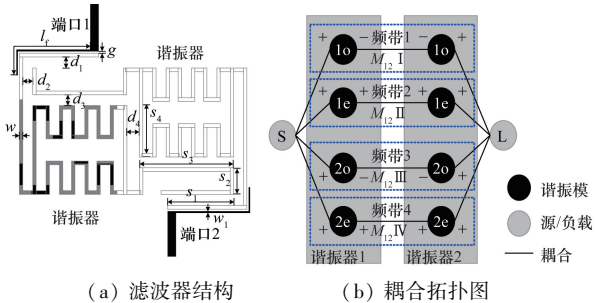


图 6 高温超导四频带滤波器结构及耦合拓扑图

经电磁仿真、优化、加工和测试,得到电路实物图和仿真测试结果图,如图 7 所示。通带测试最大插入损耗为 0.25 dB,同样远小于普通微带滤波器。此外,由谐振器双路径结构和伪交趾耦合结构产生的三个传输零点提高了通带选择性和带外衰减。整体电路尺寸为 11.35 mm × 6.5 mm。

3 高阶高温超导双频带滤波器研究

由图 4 和图 7 可知,虽然零点在一定程度上提

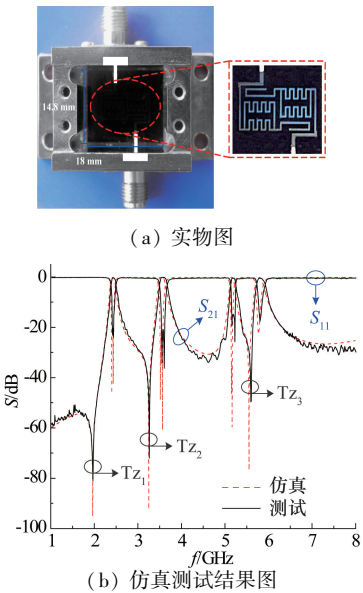


图 7 高温超导滤波器实物图和仿真测试结果图

高了通带的选择性和带外衰减特性,但通带矩形度仍需进一步提高,主要原因还是阶数较低。为充分发挥高温超导材料优势,研究团队还研究和设计了一系列高阶高温超导多频带滤波器,下面介绍其中两款。

3.1 基于弱耦合谐振器对的双频窄带滤波器设计

设计窄带滤波器要求谐振器与谐振器间的耦合比较小。一般地,增加谐振器耦合间距可以减小耦合,但电路尺寸较大,因此需合理设计谐振器拓扑结构,减弱相邻谐振器间的耦合系数。

为满足弱耦合要求,我们设计了一款新型混合螺旋谐振器^[11],通过绕向不同抵消部分电磁辐射,从而达到减弱耦合的目的。图 8 给出了四种耦合结构,排列不同,其耦合强度和耦合极性也不尽相同,如图 8(e) 所示。由图可知,图 8(a) 和 (b)(c)(d) 耦合极性不同,为磁耦合,其余三个为电耦合,可利用极性不同的耦合对实现混合电磁耦合,从而产生传输零点,提高通带选择性和带外衰减。

基于提出的混合螺旋谐振器结构,设计了一款八阶的高温超导双频窄带滤波器,结构如图 9 所示。如图所示,采用了枝节加载双模谐振器作为双频通道的共同谐振器,实现了两个窄带通道的独立设计,极大地简化了设计流程;同时,通过采用不同耦合极性的谐振器对实现了混合电磁耦合。

经电磁仿真和优化,得到电路实物图和仿真测试结果如图 10 所示。两个频带的中心频率和带宽分别为 1.86 GHz 和 2.16 GHz 以及 0.18% 和 0.25%。带内最小插入损耗分别为 0.23 dB 和

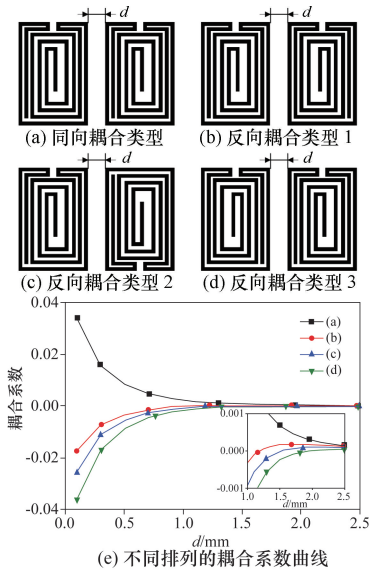


图 8 混合螺旋谐振器耦合结构及其耦合系数曲线

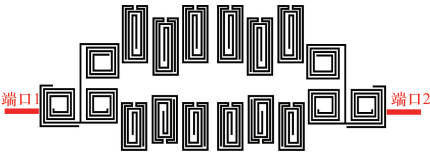


图 9 基于共用谐振器和螺旋谐振器的双频窄带滤波器

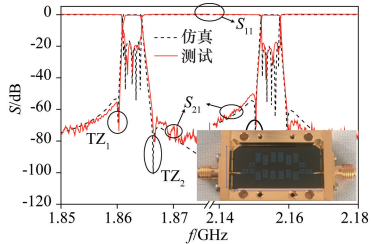


图 10 高温超导双频窄带滤波器仿真测试结果

0.19 dB。此外,由于电磁耦合,在滤波器通带两边分别产生了两个传输零点,极大地提高了通带选择性和带外衰减特性。

3.2 基于双模谐振器的双频滤波器设计

3.1 节采用组合谐振器方式设计双频滤波器,相当于两个通道以并联形式(两组谐振器)实现。而本节,我们采用双模谐振器以级联形式设计双频滤波器。

图 11(a) 给出了我们提出的一种新型双模发夹环谐振器结构图^[12],在发夹环谐振器内部插入短的微带线。图 11(b) 和 (c) 给出了两个谐振频率的电流分布图,可知两个频率可独立控制,并且横向级联耦合时,具有两个耦合自由度。

基于双模发夹环谐振器,设计了一款八阶的高温超导双频带滤波器,如图 12 所示。为缩减电路尺寸,对谐振器两开路线向内弯折处理,同时加入金属贴片,增加电容效应。同时,相邻两谐振器间采用反

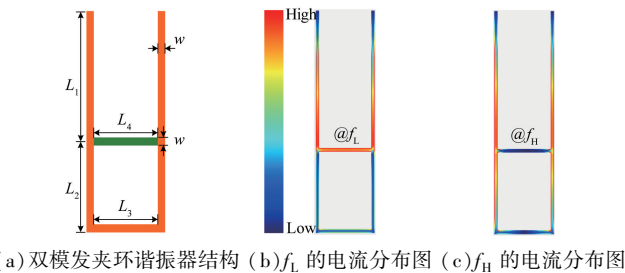
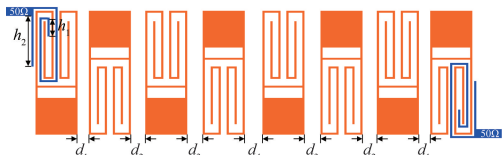


图 11 双模夹环谐振器结构及两个谐振频率的电流分布

向耦合结构方式可产生多个传输零点,提高通带选择性。此外,为提供更多的设计自由度,我们采用双馈线结构,实现了两个通带外部 Q 值的独立设计。



双频带平衡滤波器的改进型环形加载多模谐振器结构。该结构采用了并联支线结构,是一个完全对称结构,以便于四端口馈电和高阶电路级联。

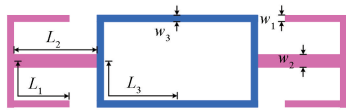


图 17 改进型环形加载多模谐振器结构

基于提出的改进型环形加载多模谐振器结构,我们设计了一款八阶的高温超导双频带平衡滤波器,电路结构如图 18 所示。电路设计时,通过在环内部两端加入金属贴片提高差模频率调控自由度,而弯折实现了电路的小型化。此外,为抑制共模信号的传输,采用在谐振器中间加载枝节元素实现相邻谐振器的共模频率的错开。

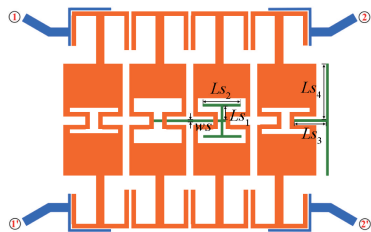


图 18 八阶高温超导双频带平衡滤波器

经电磁仿真、优化、加工和测试,得到电路实物图和仿真测试结果,如图 19 所示。两个差模通带的测试最大插入损耗为 0.13 dB 和 0.16 dB,同时带内共模抑制分别为 63 dB 和 40 dB,很好地抑制了共模噪声。

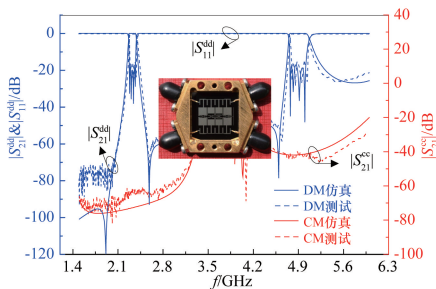


图 19 八阶高温超导双频带平衡滤波器仿真测试结果和电路实物图

5 结论

本文介绍了研究团队近年来在高温超导多频带滤波器和平衡滤波器方面的研究工作,重点介绍了基于多模谐振结构在多频带和高阶双频带以及平衡滤波器的研究设计。多模谐振器可以缩减电路尺寸,高温超导材料可以极大地降低滤波器电路的插入损耗,而平衡电路设计可以很好地抑制共模噪声。

本文的研究工作在高灵敏度和强干扰的现代和未来无线通信系统中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

[1] Onnes H K. On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears[J]. Communication of Physics Laboratory of Leiden University,1911

[2] 孙亮,黎红,张雪强,等. 高温超导滤波器应用的探索与实践[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012,42(8): 767-792

Sun L, Li H, Zhang X Q, et al. The applications of HTS filters: exploration and practice [J]. Scientia Sinica : Physica, Mechanica & Astronomica, 2012,42(8): 767-792

[3] Frederick H, Ming Z, Libin Y. A narrowband superconducting filter using spirals with a reversal in winding direction[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2006,54(11):3954-3959

[4] 郭旭波,魏斌,张晓平,等. 采用电容耦合式馈线的高温超导滤波器设计[J]. 微波学报,2007,23(S):73-76

Guo X B, Wei B, Zhang X P, et al. Design of high-temperature superconducting filter with capacity-coupled feedlines[J]. Journal of Microwaves, 2007,23(S):73-76

[5] Yu T, Li C G, Li F, et al. A wideband superconducting filter using strong coupling resonators for radio astronomy observatory[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques,2009,57(7):1783-1789

[6] 金世超,郭旭波,郭栋,等. 基于高温超导材料的折叠交指低通滤波器设计[J]. 微波学报,2012,28(4):69-72

Jin S C, Guo X B, Guo D, et al. Design of folded interdigital lowpass filter on high temperature superconductor [J]. Journal of Microwaves, 2012,28(4): 69-72

[7] Lu X L, Wei B, Cao B S, et al. Design of a high-order dual-band superconducting filter with controllable frequencies and bandwidths [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2014,24(2):1500205

[8] Sekiya N, Tsuruoka T. Improvement of filter properties of independently tunable superconducting dual-band bandpass filter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2019, 29(5):1-4

[9] Liu H W, Lei J H, Guan X H, et al. Compact high-temperature superconducting filter using multimode stub-loaded resonator[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2014, 24(2): 8-15

[10] Liu H W, Ren B P, Guan X H, et al. Quad-band high-temperature superconducting bandpass filter using quad-

- multiple-mode square ring loaded resonator[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(12): 2931-2941
- [11] Zhu S S, Wen P, Liu H W, et al. Dual narrowband HTS filter with controllable transmission zeros and wide stopband by using mixed electric and magnetic coupling[A]. 2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD) [C], IEEE, 2018. 1-2
- [12] Liu H W, Ren B P, Hu S X, et al. High-order dual-band superconducting bandpass filter with controllable bandwidths and multitransmission zeros[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(10): 3813-3823
- [13] Liu H W, Xu Y C, Liu F, et al. High-order balanced superconducting filter with high selectivity, low insertion loss, and wide stopband range for radio astronomy[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(7): 2720-2729
- [14] Ren B P, Ma Z W, Liu H W, et al. Differential dual-band superconducting bandpass filter using multimode square ring loaded resonators with controllable bandwidths [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 2018, 67(2): 726-737



刘海文 男,1975 年生,教授,百千万人才国家级人选。主要研究方向:高温超导微波电路、射频集成电路、无线通信系统与天线技术、超导电子与雷达工程。

E-mail: haiwen_liu@hotmail.com



任宝平 男,1988 年生,讲师,博士。主要研究方向:射频/微波无源器件、高温超导微波滤波器。

E-mail: baoping1988@hotmail.com