

适用于雷达接收系统的高温超导 窄带滤波器的研制^{*}

李春光 张 强 孙 亮 孟庆端 王云飞

黄建冬 李 翡 何艾生 黎 红

张雪强 何豫生

中国科学院物理研究所超导国家重点实验室, 北京 603 信箱 100083

顾长志 罗 强

中国科学院物理研究所微加工实验室, 北京 603 信箱 100083

本文介绍一种为某专用雷达设计制作的工作于 L 波段的高温超导窄带带通滤波器. 该滤波器为 10 阶微带谐振器级联(CQ)滤波器, 引入两个交叉偶合构成一对传输零点形成准椭圆函数传输特性来增加带外陡度. 为减小非近临谐振器间寄生耦合对滤波器传输特性的影响, 对所采用的谐振器结构进行了精心选择. 整个滤波器制作在一块 2 英寸的 MgO 衬底 YBCO 片上, 封装后滤波器的整体尺寸为 $60\text{mm} \times 30\text{mm} \times 18\text{mm}$. 滤波器带宽为 5MHz (FBW 小于 0.4%). 实测滤波器带边陡度超过 100dB/MHz, 在中心频率(3MHz 以外频域抑制好于一60dB, 滤波器宽带抑制好于一80dB, 滤波器最小插损 0.3dB.

关键词: 高温超导, 窄带滤波器, 微波应用

PACC: 7470V, 7870G, 4280C

1 引 言

高温超导体的发现, 是二十世纪基础研究的一个极为重要的成果. 十几年来, 人们一直为将这一成果尽快转化为生产力而努力. 一方面, 由于高温超导薄膜表面电阻极小, 用高温超导薄膜制成的滤波器具有非常高的带外抑制和非常小的带内插损. 另一方面, 由于高温超导滤波器系统所需制冷设备带来的成本居高不下, 使其替代常规滤波器大规模商业应用带来很大难度. 所以, 充分发挥高温超导的优势, 研制出常规器件根本不能实现的高性能滤波器就成为高温超导滤波器实现真正实际应用的突破口. 在现代微波通信中, 由于频率资源日益紧张, 各种噪声干扰日益加剧, 往往需要通带非常窄, 而且陡度非常高的滤波器. 由于滤波器的插损与百分比带宽 FBW 成反比, 与滤波器阶数成正比^[1], 所以对于相对带宽 (FBW) 小于 1% 的高阶窄带滤波器, 很难用常规材料实现. 实际上如果 FBW 在 3% 以下, 常规金属

^{*} 国家自然科学基金项目(项目编号:10474127)和国家纳米科学中心资助项目.

收稿日期: 2005-03-30

微带甚至不能形成完整的通带. 过去十几年来, 人们在高温超导滤波器的研制上取得了长足进步, 但是, 由于高温超导滤波器所采用的微带谐振器本身电磁辐射特性的限制, 真正能在 L 波段实现 0.5% 以下带宽的滤波器还是一个难关, 虽然国外有过几例窄带超导滤波器的文献报道^[2~4], 但其性能指标都存在一些不足, 离实用还有较大距离.

本文介绍一种为某专用雷达设计制作的工作于 L 波段的高温超导窄带带通滤波器. 该滤波器为 10 阶微带谐振器 CQ 滤波器, 引入两个交叉偶构成一对传输零点形成准椭圆函数传输特性来增加带外陡度. 滤波器带宽仅为 5 MHz ($FBW < 0.4\%$). 实测滤波器带边陡度超过 100 dB/MHz, 在中心频率 ± 3 MHz 以外频域抑制好于 -60 dB, 而宽带抑制好于 -80 dB.

2 滤波器理论设计

通常用的车比雪夫型滤波器没有有限频率传输零点, 当滤波器要求较高的带边陡度时需要增加级数. 而级数的增加往往带来插损增加和物理尺寸过大等问题. 椭圆函数滤波器又难以用微带谐振器实现. 为解决陡度问题, 可以在车比雪夫型滤波器基础上人为的引入有限频率处的传输零点, 这样的滤波器称为准椭圆函数滤波器^[1]. 准椭圆函数滤波器可以有多种拓扑结构来实现, 其中 CQ 滤波器通过在每四个谐振器间引入一个交叉耦合来实现一对传输零点, 这样的各个交叉耦合间彼此相互独立, 便于调谐.

本文的超导滤波器是为某雷达接收系统设计的工作于 L 波段的前级滤波器, 在滤波器工作频段附近存在大量的干扰信号, 因此要求滤波器具有相当高的频率选择性和较小的插损. 综合考虑滤波器性能要求和超导膜的尺寸, 我们选定 10 阶滤波器并在 $\Omega_c = \pm 1.3$ 处引入两个传输零点来增加其带边陡度. 滤波器耦合结构如图 1 所示, 其中谐振器 2、5 和 6、9 间的交叉耦合用来实现传输零点.

对图 1 所示的谐振器耦合网络, 按 A. Atia 和 Williams^[5]的分析可得

$$\begin{cases} S_{21} = -2i(Q_{e1}Q_{e2})^{\frac{1}{2}} \cdot [A]_{10,1}^{-1} \\ S_{11} = 1 + 2i \cdot \frac{1}{Q_{e1}} \cdot [A]_{1,1}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $[A] = [\Omega \cdot I - i \cdot Q + M]$, I 为 10 阶单位矩阵, Q 为 10 阶输入输出矩阵, 其元素除 $Q(1,1) = 1/Q_{e1}$ 和 $Q(10,10) = 1/Q_{e2}$ 外全为零, M 为耦合矩阵.

滤波器设计中最关键的一步是根据(1)式确定 Q 和 M . 这是一个复杂的计算过程, 可以用数值优化法求得. 对于我们的滤波器, 根据我们自己编写的优化程序可求得: $Q_{e1} = Q_{e2} = 0.8992$, $m_{12} = m_{910} = 0.8699$, $m_{23} = m_{89} = 0.5160$, $m_{34} = m_{78} = 0.6919$, $m_{45} = m_{67} = 0.4784$, $m_{56} = 0.5225$, $m_{25} = m_{69} = -0.1625$, M 的其他元素值为零. 在选定具体的谐振器后, 各谐振器间距可根据上述参数, 经过低通到带通频率的变换后, 由电磁仿真软件求出^[1].

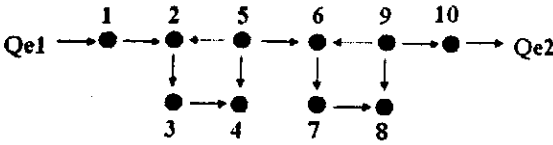


图 1 滤波器耦合结构, 其中●表示谐振器, 而箭头代表耦合, Q_{e1} 和 Q_{e2} 为输入输出耦合

3 谐振器和滤波器的电磁仿真和制作

对于窄带滤波器,其实现的主要困难在两个方面,一是由于滤波器插损与 FBW 成反比,所以对于 FBW 小于 1% 的高阶窄带滤波器,滤波器插损会显著增大. 在采用超导材料后,插损问题很容易解决. 窄带滤波器另一个困难在于非近临谐振器间寄生耦合对滤波器传输特性的影响. 由于超导谐振器是微带结构,各个谐振器间都或多或少存在耦合. 在图 1 的耦合结构中,除了近临谐振器间和引入的交叉耦合(称为主耦合)外,其他谐振器间耦合都假设为零. 在 FBW 很小的情况下,主耦合本身数值($M \times FBW$)非常小,只有 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级,寄生耦合很容易与之相比,不能忽略,这时寄生耦合对滤波器的频率响应会带来很大影响. 图 2 显示本 10 阶原型滤波器当谐振器 1 和 10 间存在耦合时对滤波器传输特性的影响. 可以很明显的看出,当 $M_{1,10}/M_{1,2}$ 达到 0.001,即 $M_{1,10}$ 超过主耦合的 1‰ 时,带外抑制就会明显变差. 而其他寄生耦合还会使频响高低频不对称. 为解决这一问题,必须对所采用的谐振器进行精心设计,使其远场辐射尽量低. 图 3 显示我们所设计的谐振器耦合系数 k 与谐振器间隔 s 的关系曲线,当谐振器间距从 0.5mm 增大到 3mm 时, k 迅速从 10^{-2} 降低到 10^{-5} 以下,降幅超过 1000 倍,保证了寄生耦合对滤波器传输特性不会有很大影响. 图中同时列出了文献[2,4]中所用的低耦合谐振器,可以看出,我们的谐振器远场耦合远小于上两者.

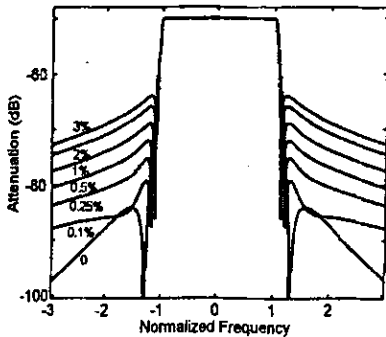


图 2 10 阶原型滤波器当谐振器 1 和 10 间耦合 $M_{1,10}/M_{1,2}$ 分别等于 0, 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%, 2%, 3% 时对滤波器传输特性的影响

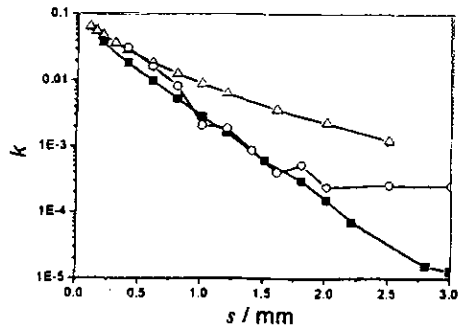


图 3 谐振器耦合系数 k 与谐振器间隔 s 的关系曲线, ■ 为本文滤波器所用谐振器, ○ 为文献[4]所用谐振器,而 △ 为文献[2]所用的申请美国专利的谐振器

4 实验结果及讨论

在选定谐振器后,用商业电磁仿真软件确定谐振器的间隔位置以及输入输出引线,最后对整个滤波器频率响应进行仿真优化. 图 4 显示最终定版滤波器电磁仿真频率响应曲线. 滤波器版图尺寸为 $50\text{mm} \times 22\text{mm}$.

整个滤波器制作在一块 2 英寸 MgO 衬底 YBCO 超导基片上. 滤波器的光刻刻蚀及封装等都在物理所独立完成. 图 5 显示用 Agilent8510C 测得的滤波器在 70K 温度下的实测频率响应曲线. 从图中可以看出,该 10 阶滤波器较好地实现了理论设计的结果,具有良好的带外频率抑制和带边陡度,滤波器带边陡度超过 $100\text{dB}/\text{MHz}$,在偏离带边 0.5MHz 处带外抑

制已高达 60dB,滤波器宽带抑制好于一80dB. 滤波器频率响应高低频段基本对称证明了我们所选择的谐振器寄生耦合弱,适合于制作窄带滤波器. 该滤波器最小插损 0.3dB(包括两个 SMA 接头),电压驻波比好于 1 : 1.5(滤波器返回损耗好于一15dB). 此滤波器与一增益为 30dB 的放大器组成的雷达的接收前端子系统在整个通带内噪声系数都小于 1dB,该子系统正在进行与雷达的连机实验.

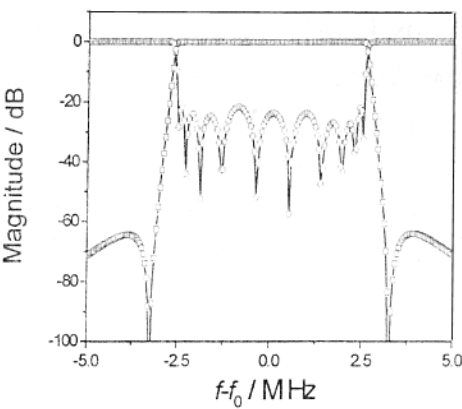


图 4 滤波器的电磁仿真曲线

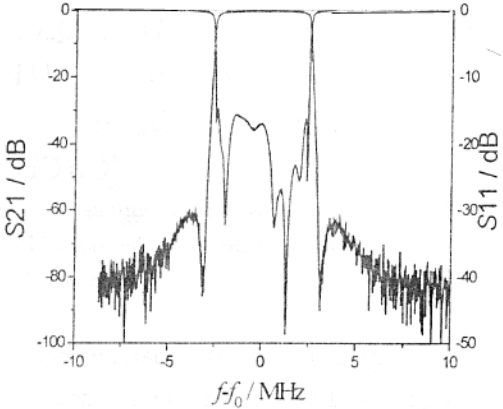


图 5 滤波器在 70K 温度下的 S 参数测量曲线

5 结 论

本文报道一种工作于 L 波段的高温超导窄带带通滤波器. 该滤波器带宽为 5MHz (FBW 小于 0.4%). 整个滤波器制作在一块 2 英寸的 MgO 衬底 YBCO 片上,封装后滤波器的整体尺寸为 60mm×30mm×18mm. 实测滤波器带边陡度超过 100dB/MHz,在中心频率(3MHz 以外频域抑制好于一60dB,而宽带频率抑制好于一80dB. 滤波器性能指标达到国际先进水平. 该滤波器与一增益为 30dB 的放大器组成的子系统在整个通带内噪声系数都小于 1dB.

[1] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Copyright 2001 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-38877-7.

[2] H. R. Yi, "Thin Film Resonators," United States Patent application pending.

[3] Shen Ye and Carles Sans, IEEE MTT-s Int. Microwave Symp. Dig., (2003) 1885~1888.

[4] Jia-sheng Hong and Eamon P. McErlean, IEEE MTT-s Int. Microwave Symp. Dig., (2004), 1105~1108.

[5] A. Atia and Willams, COMSAT Tech. Rev., 1(1971), 1, 22~43.

DESIGN OF HIGH PERFORMANCE NARROW BAND HTS FILTER FOR L-BAND RADAR SYSTEM*

¹LI CHUN-GUANG ¹ZHANG QIANG ¹SUN LIANG ¹MENG QING-DUAN
¹WANG YUN-FEI ¹HUANG JIAN-DONG ¹LI FEI
¹ZHANG XUE-QIANG ¹HE AI-SHENG ¹LI HONG
²LUO QANG ²GU CHANG-ZHI ¹HE YU-SHENG

¹*Superconductivity Laboratory, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

²*Laboratory of Microfabrication, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

(Received 30 March, 2005)

An ultra selective narrow bandpass HTS filter in L band has been designed and fabricated. This cascaded quadruplet (CQ) filter consists of 10 resonators and two cross coupling structures that produce two transmission zeros near the band edges. The coupling matrix M and the external quality factors Q_{e1} , Q_{e2} are obtained by an analytical gradient-based optimization technique. The exact filter layout was simulated and optimized by full-wave EM simulation using Sonnet software. The filter was fabricated on a double-sided YBCO film epitaxially grown on a two-inch diameter MgO wafer. The measured filter response showed a bandwidth of 5 MHz ($FBW < 0.4\%$). The insertion loss at the passband center was only 0.3dB including two SMA connectors. Steep rejection slopes were obtained at the band edges and the measured skirt slope has exceeded 100 dB/MHz, resulting in an excellent out of band rejection very close to the band-edge.

Keywords: HTS, Narrow Bandpass Filter, Microwave application

PACC: 7470V, 4280C, 7870G

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10474127) and National Center for Nanoscience and Technology, China

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>