

VHF频段极窄带高温超导滤波器的研制

刘英¹, 田烁鑫¹, 孙延东², 王守宇¹, 季来运^{2*}

¹天津师范大学物理与材料科学学院, 天津

²天津海泰超导电子有限公司, 天津

收稿日期: 2022年4月19日; 录用日期: 2022年5月19日; 发布日期: 2022年5月27日

摘要

本文研制了一款VHF频段的四阶极窄带高温超导滤波器, 该滤波器相对带宽为0.8‰, 插入损耗小于0.7 dB。滤波器基于切比雪夫原型设计, 由直径2英寸的氧化镁(MgO)为基底的高温超导薄膜材料DyBCO制作, 采用Sonnet软件进行滤波器的电路搭建、电磁场仿真。文章给出了极窄带滤波器的等效电路图、理论曲线、耦合矩阵、物理电路、模拟仿真和实际测试结果。

关键词

VHF, 高温超导滤波器, 极窄带宽

Development of Very Narrow Band High Temperature Superconducting Filters in VHF Band

Ying Liu¹, Shuoxin Tian¹, Yandong Sun², Shouyu Wang¹, Laiyun Ji^{2*}

¹School of Physics and Materials Science, Tianjin Normal University, Tianjin

²Tianjin Hi-Tech Superconducting Electronic Co., Ltd., Tianjin

Received: Apr. 19th, 2022; accepted: May 19th, 2022; published: May 27th, 2022

Abstract

In this paper, a fourth-order very narrow-band high-temperature superconducting filter with a relative bandwidth of 0.8‰ and insertion loss less than 0.7 dB is developed for the VHF band. The filter is based on a Chebyshev prototype design and is fabricated from DyBCO, a 2-inch diameter

*通讯作者。

magnesium oxide (MgO) based high-temperature superconducting thin film material. The circuit construction and electromagnetic field simulation of the filter are performed by using Sonnet software. Equivalent circuit diagrams, theoretical curves, coupling matrices, physical circuits, simulations and practical test results of the very narrow band filter are presented in the article.

Keywords

VHF, High-Temperature Superconducting Filter, Very Narrow-Bandwidth

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

自 1911 年荷兰物理学家昂纳斯发现超导材料以来, 尤其 1987 年发现工作于液氮温区的 YBCO 高温超导材料, 超导材料的应用研究得到很大的发展。与普通金属相比, 超导材料的表面电阻接近于零, 特别适合制作高性能的微波无源器件。高温超导材料制作的滤波器具有极低的插入损耗、极陡的过渡带以及极高的带外抑制的优势。高温超导滤波器在雷达系统、移动通信、电子对抗战、军事通信、深空探测等领域具有广泛的应用前景[1] [2] [3]。VHF (Very high frequency)频段为甚高频, 该频段内存在大量的无线通讯系统, 如电视、导航、广播等信号, 与其他工作频段相比较, VHF 频段的电磁环境更加恶劣, 设备间的相互干扰也更严重。本工作设计了一款极窄带宽的高温超导滤波器来解决现实问题。

2013 年天津海泰超导公司成功设计了一款相对带宽 1%的六阶极窄带宽高温超导滤波器[4], 达到了高温超导滤波器窄带宽的最新高度。该文献中设计的中心频率约为 1 GHz, 属于超高频。2020 年张戈戎等人完成了一款相对带宽为 3.3%的八阶窄带滤波器设计[5], 可有效地提高系统的抗干扰性能。同年, 杭州电子科技大学顾月等人成功实现了一款中心频率为 45.5 MHz、相对带宽为 2%的六阶高温超导窄带滤波器[6], 为 VHF 频段的窄带滤波器提供了新的解决方案。以上文献均为高温超导滤波器可以实现的极窄带宽提供了实践基础。

VHF 频段的工作频率较低, 滤波器面积较大; 带宽极窄, 要求超导薄膜的均匀性好而且超导电路的加工误差低, 增加了滤波器设计和制造的难度。本文的滤波器设计解决了这两个难点, 采用均匀阻抗谐振器有效地降低滤波器的尺寸; 采用电场耦合的方式可实现窄带宽的要求, 采用多源热共蒸法制备高温超导薄膜提高了薄膜的均匀性以及利用半导体平面精细加工工艺制作微带电路, 提高了物理电路制作的加工精度, 以便将误差控制在可接受的范围内; 成功研制了工作于 VHF 频段且相对带宽为 0.8%的四阶高温超导滤波器。

2. 理论计算

本文设计的超导滤波器工作频率为 119 MHz, 工作带宽为 100 kHz。采用切比雪夫函数原型, 根据滤波器传统设计理论公式完成滤波器从低通向带通的转化[7], 相应公式如下:

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (1)$$

$$Q_{ei} = Q_{eo} = \frac{g_i}{FBW} \quad (2)$$

其中, $K_{i,i+1}$ 为第 i 和 $i+1$ 个相邻谐振器之间的耦合系数, Q_{ei} 、 Q_{eo} 代表输入、输出端口的外部品质因数, FBW 为滤波器的相对带宽, g_i 代表切比雪夫原型中的电导值。

四阶高温超导滤波器的等效电路如图 1 所示。采用计算机辅助设计手段完成滤波器综合计算, 可得滤波器的理论响应曲线, 如图 2 所示。

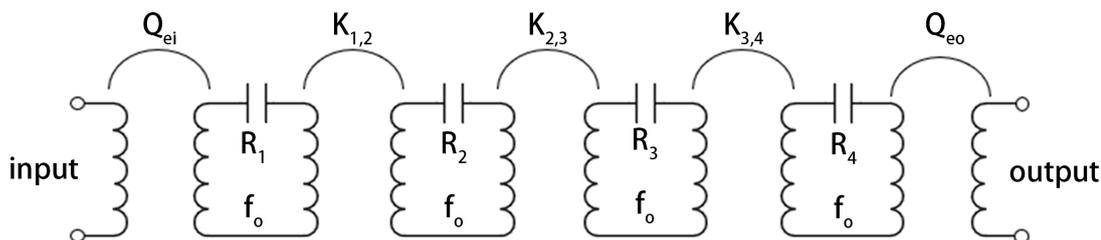


Figure 1. Equivalent circuit diagram of fourth-order superconducting filter

图 1. 四阶超导滤波器等效电路图

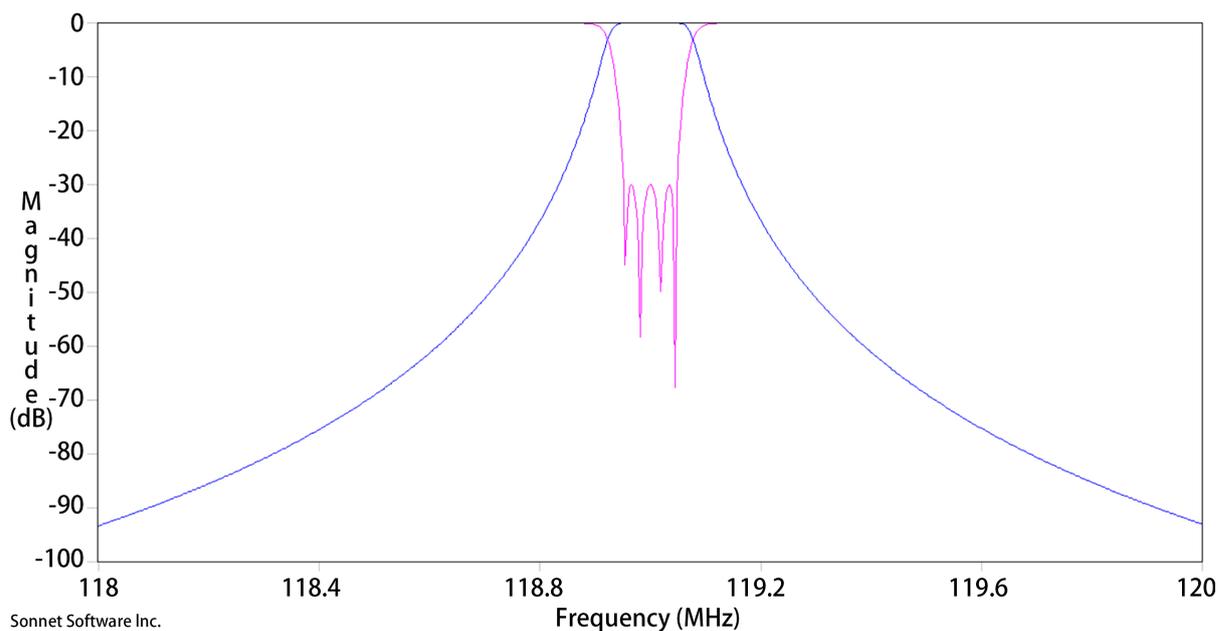


Figure 2. Theoretical curve

图 2. 理论曲线图

提取出四阶高温超导滤波器的耦合矩阵及经过计算可得到输入、输出端口的 Q 值。

$$\begin{bmatrix} 0 & K_{1,2} & 0 & 0 \\ K_{2,1} & 0 & K_{2,3} & 0 \\ 0 & K_{3,2} & 0 & K_{3,4} \\ 0 & 0 & K_{4,3} & 0 \end{bmatrix}$$

其中:

$$K_{1,2} = K_{2,1} = K_{3,4} = K_{4,3} = 0.000781054,$$

$$K_{2,3} = K_{3,2} = 0.000703175,$$

$$Q_{ei} = Q_{eo} = 1190.$$

3. 滤波器的设计

超导滤波器常用的介质材料有三种：铝酸镧(LaAlO₃)的孪晶现象使基底介电常数分布不均匀，对于设计窄带滤波器的影响较大；蓝宝石(Al₂O₃)与超导薄膜的晶格失配较大且存在各项异性问题；氧化镁(MgO)材料的介电常数分布均匀，特别适合窄带高性能滤波器的设计，不足是介电常数较低，半波长微带滤波器电路占用的面积会较大。本文设计采用直径为2英寸、厚度为0.5 mm的氧化镁为基底，介电常数取9.69。

谐振器是滤波器的基本构成单元，其结构影响着滤波器的性能和整体布局。本文对阶梯阻抗谐振器(Stepped Impedance Resonator, SIR)和均匀阻抗谐振器(Uniform Impedance Resonator, UIR)两种谐振器结构做分析对比。谐振器的结构如图3所示。

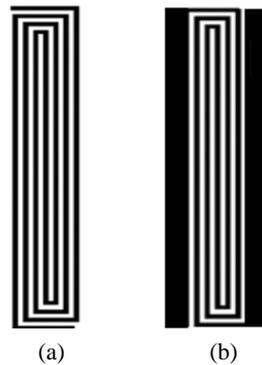


Figure 3. (a) Schematic diagram of UIR resonator structure; (b) Schematic diagram of SIR resonator structure

图 3. (a) UIR 谐振器结构示意图；(b) SIR 谐振器结构示意图

UIR 结构谐振器长度计算公式如公式(3)，

$$L = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

其中 f_0 为滤波器的中心频率， c 为自由空间电磁波传播速度约 3×10^8 m/s， ϵ_{eff} 为基底的有效介电常数， λ_0 为波长。

SIR 结构谐振器的长度根据文献公式计算[8]：

$$\theta_T = \theta_1 + \theta_2 = \theta_1 + \arctan(K/\tan \theta_1) \quad (4)$$

$$L_n = \frac{2\theta_T}{\pi} \quad (5)$$

其中 θ_T 为谐振器的总电长度， θ_1 、 θ_2 分别代表电长度为 θ_1 、 θ_2 的传输线， K 为阻抗比， L_n 为归一化长度。

对于 UIR 和 SIR 谐振器在相同的间距下仿真得到的相邻谐振器之间的响应曲线如图4所示，蓝线代表 UIR 结构，黑色代表 SIR 结构。从图中可看出本文设计的谐振器在相同间距下，UIR 结构的耦合强度更弱，更适合制作窄带滤波器。

本文的谐振器排布是平行的，相邻谐振器之间的耦合系数由二者的间距确定，可由公式(6)进行计算。

$$k_{i,i+1} = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (6)$$

其中 $k_{i,i+1}$ 为第 i 和 $i+1$ 个相邻谐振器之间的耦合系数， f_1 、 f_2 是两个耦合谐振器的谐振响应频率。

本文选取了多个间距得出 UIR 和 SIR 结构的耦合系数与间距 d 的变化曲线图，如图 5 所示。

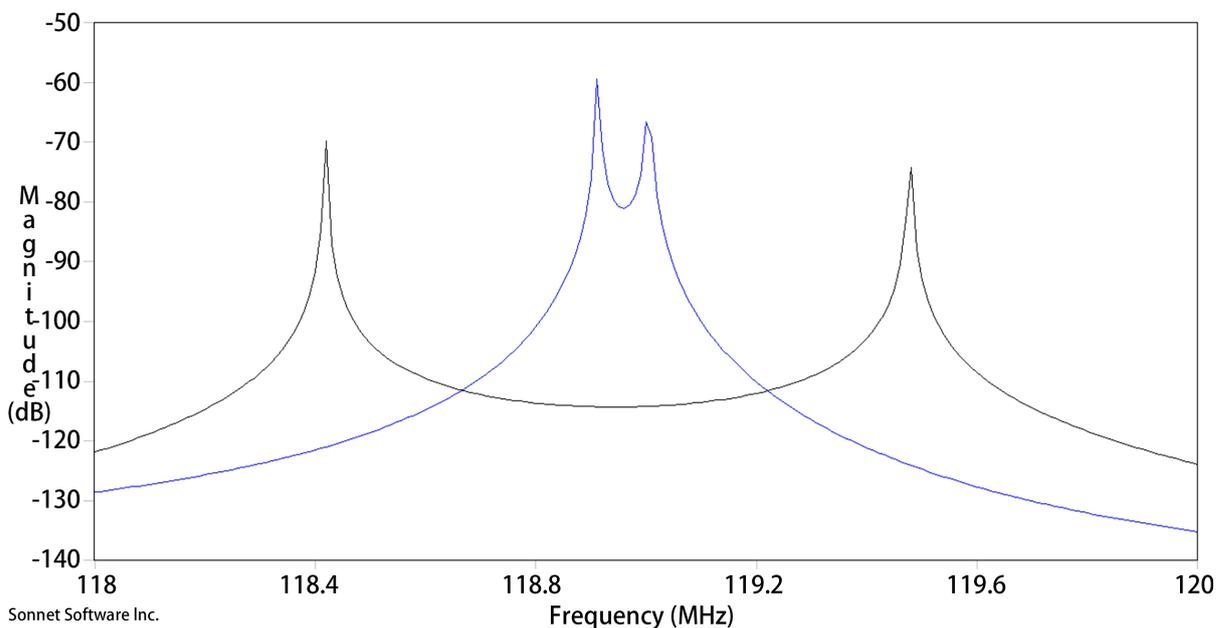


Figure 4. Comparison of coupling curves for the same spacing of SIR and UIR

图 4. SIR 和 UIR 相同间距的耦合曲线对比图

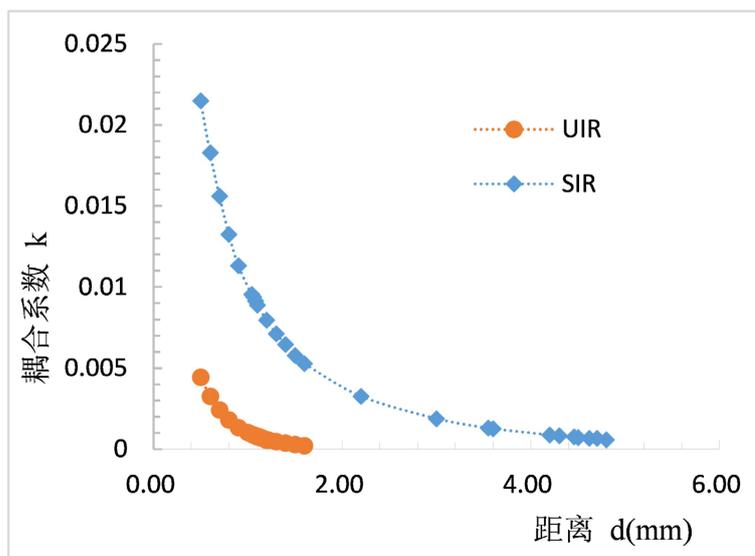


Figure 5. Plot of adjacent resonator coupling coefficient versus spacing

图 5. 相邻谐振器耦合系数与间距的关系曲线图

对比两种结构耦合系数与距离的曲线可得出，相同的间距，UIR 结构的耦合系数要远小于 SIR 结构，更适合于窄带滤波器的设计。同时本工作需在 2 英寸的基底上进行滤波器电路排布，最终采用 UIR 型旋出式螺旋结构进行滤波器整体设计。

端口激励方式为耦合激励连接，通过改变输入、输出端口的馈线和第一个谐振器之间的距离 R ，可改变外部品质因数 Q_e ，从而确定输入、输出端口的的位置，可由公式(7)进行计算。外部品质因数 Q_e 随距离 R 的变化曲线图，如图 6 所示。

$$Q_e = \frac{f_0}{BW_{-3dB}} \quad (7)$$

Q_e 为谐振器输入输出端口的外部品质因数, f_0 为中心频率, BW_{-3dB} 是仿真曲线-3 dB 处的带宽。

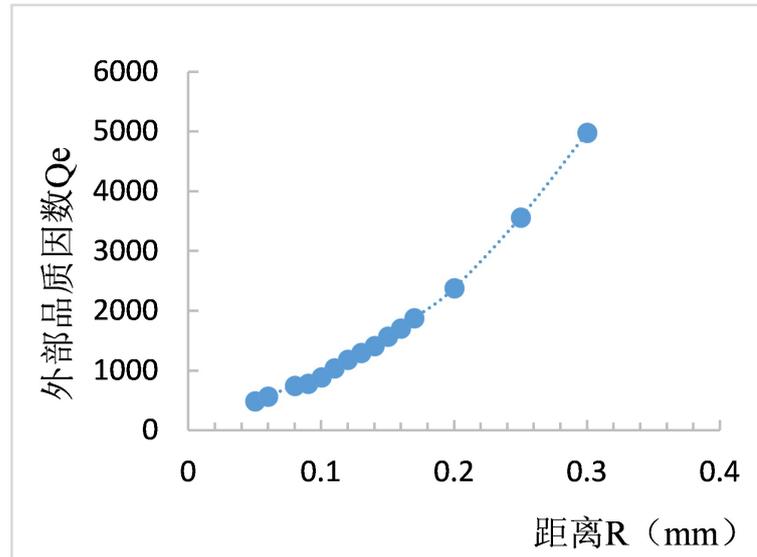


Figure 6. Plot of external quality factor versus distance R
图 6. 外部品质因数与距离 R 的关系曲线图

由滤波器综合提取的耦合矩阵结合图 5 和图 6 曲线, 就可以初步确定滤波器的物理电路, 如图 7 所示。利用电磁仿真软件 Sonnet 对整体的电路图进行电磁场模拟计算, 可以得到滤波器的仿真结果。由于本文设计的滤波器的带宽极窄, 同时存在不可避免的寄生效应, 所以对滤波器的物理电路进行微调和优化是必要的。最终得到的仿真曲线如图 8 所示, 滤波器中心频率为 119 MHz, 带宽为 100 kHz, 回波损耗优于 30 dB, 阻带抑制达到 70 dB。

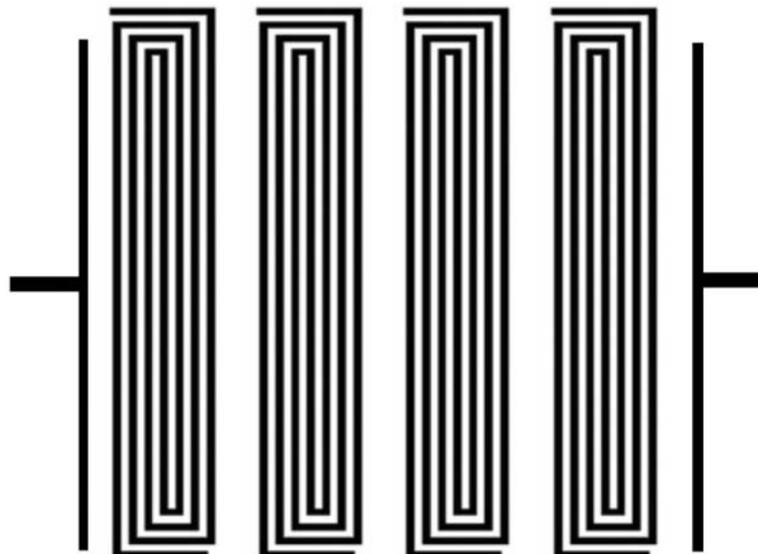


Figure 7. Schematic diagram of high-temperature superconducting filter structure
图 7. 高温超导滤波器结构示意图

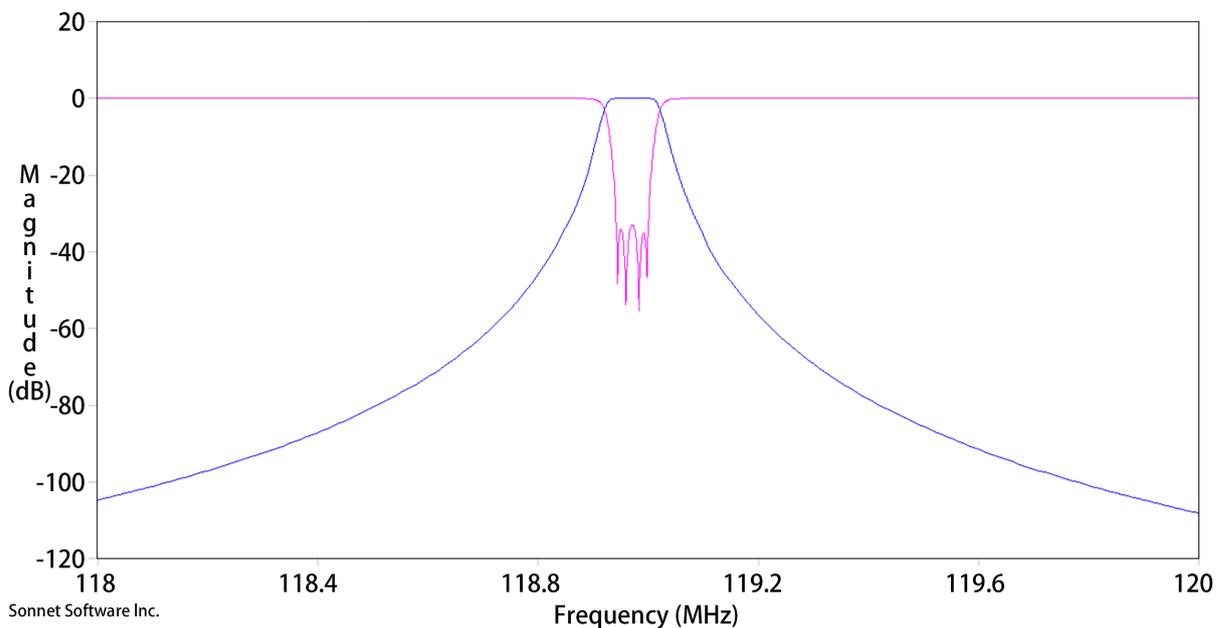


Figure 8. High-temperature superconducting filter simulation curve

图 8. 高温超导滤波器仿真曲线

4. 滤波器测试结果

超导滤波器的衬底为 2 英寸 0.5 mm 厚度的氧化镁基片，采用多源共蒸发技术制备 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 高温超导薄膜；滤波器超导微带电路采用平面精细加工工艺完成，经过涂胶、曝光、显影、刻蚀、切片等过程，得到超导滤波器电路芯片；将高温超导电路封装在铜屏蔽盒中，输入输出端口采用标准 SMA 接头。超导滤波器组装完成后，进行低温测试，采用斯特林制冷机制冷，使超导滤波器进入超导态，利用 Agilent 公司的网络分析仪 8753ES 进行性能测试。当工作温度稳定为 70 K 时，测试得到的滤波器 S_{11} 、 S_{21} 曲线，

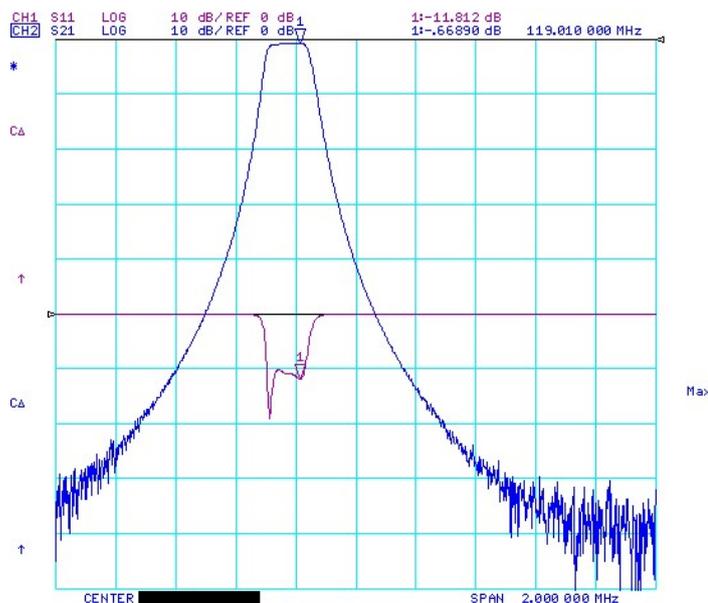


Figure 9. Fourth-order superconducting filter test results

图 9. 四阶超导滤波器测试结果图

如图 9 所示。由超导滤波器的测试结果得到, 滤波器工作频率为 119 MHz, 插入损耗约为 0.67 dB, 带边陡度低频侧为 297 dB/MHz, 高频侧为 269 dB/MHz, 带外抑制高于 70 dB, 与设计吻合度较高。回波损耗优于 10 dB, 与设计的 30 dB 差距较大, 分析应该是加工精度误差以及基片的非均匀所引起, 滤波器输入和输出阻抗均为 50 Ω , 测试结果总体较为理想。

5. 结论

采用均匀阻抗谐振器结构(UIR)在氧化镁(MgO)基底上设计并制造了一款相对带宽为 0.8%且工作于 VHF 频段的四阶高温超导滤波器。文章给出了滤波器的等效电路、理论曲线、耦合矩阵, 介绍了高温超导滤波器物理电路的设计过程与仿真结果。测试结果表明, 除了回波损耗外, 中心频率、带宽、带边陡度以及带外抑制等设计指标均与仿真结果有很高的一致性。

参考文献

- [1] Onnesh, K. (1911) The Resistance of Pure Mercury at Helium Temperatures. *Communications Physical Laboratory University of Leiden*, **12**, 1.
- [2] Wu, M.K., Ashburn, J.R., Torng, C., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., *et al.* (1987) Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters*, **58**, 908. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908>
- [3] 胡来平, 张士刚, 张梅, 丁晓杰, 王生旺. 深空探测用 X 波段高带外抑制超导滤波器的研制[J]. 低温与超导, 2020, 48(7): 82-85. <https://doi.org/10.16711/j.1001-7100.2020.07.017>
- [4] 季来运, 高文斌, 何立娟, 王朗, 孙钧, 李演奇. 六阶极窄带宽高温超导滤波器的研制[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(8): 1058-1064.
- [5] 张戈戎. UHF 频段无线收发组件的设计与仿真[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [6] 顾月, 官伯然, 杜铁钧. 一种 VHF 高温超导窄带滤波器的研究[J]. 微波学报, 2020, 36(6): 61-63+69. <https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.202006013>
- [7] Hong, J.S.G. and Lancaster, M.J. (2004) *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [8] Makimoto, M. and Yamashita, S. (1980) Bandpass Filters Using Parallel Coupled Stripline Stepped Impedance Resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **28**, 1413-1417. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1980.1130258>