

22阶C波段高温超导宽带滤波器的研制

闫旭¹, 李灏毅², 王昭月², 季来运², 孙延东², 闫鑫^{2*}

¹河南财经政法大学计算机与信息工程学院, 河南 郑州

²天津海芯电子有限公司, 天津

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年12月1日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

本文研制了一款22阶高温超导宽带滤波器, 成功实现了矩形系数小于1.2的多阶高温超导宽带滤波器的设计与制作。文中给出了该款滤波器的等效电路、理论频率响应曲线、理论耦合矩阵、设计过程、物理电路结构及模拟结果, 有效地解决了C波段信号干扰严重等问题。最后在0.5 mm厚的铝酸镧(LaAlO₃)衬底上的DyBa₂Cu₃O₇ (DyBCO)高温超导薄膜上, 成功制作出22阶高温超导宽带滤波器。滤波器的工作频率为3950 MHz, 相对带宽为15.19%, 插入损耗大于-1.4 dB, 带外抑制小于-60 dB以上, 实测结果与模拟结果吻合良好。

关键词

高温超导滤波器, 矩形系数, 铝酸镧, 镱钡铜氧

Development of 22nd-Pole C-Band High Temperature Superconducting Wideband Filter

Xu Yan¹, Haoyi Li², Zhaoyue Wang², Laiyun Ji², Yandong Sun², Xin Yan^{2*}

¹College of Computer and Information Engineering, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou Henan

²Tianjin Hai-Sen Electronics Co., Ltd., Tianjin

Received: November 8, 2025; accepted: December 1, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

This paper presents the development of a 22nd-pole high-temperature superconducting (HTS) wideband filter, successfully achieving the design and fabrication of a multi-order HTS wideband filter

*通讯作者。

文章引用: 闫旭, 李灏毅, 王昭月, 季来运, 孙延东, 闫鑫. 22 阶 C 波段高温超导宽带滤波器的研制[J]. 电路与系统, 2025, 14(4): 75-83. DOI: 10.12677/ojcs.2025.144008

with a rectangular coefficient of less than 1.2. The equivalent circuit, theoretical frequency response curve, theoretical coupling matrix, design process, physical circuit structure, and simulation results of the filter are provided, effectively addressing issues such as severe signal interference in the C-band. Finally, a 22nd-pole HTS wideband filter was successfully fabricated on a 0.5 mm-thick lanthanum aluminate (LaAlO_3) substrate coated with $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (DyBCO) high-temperature superconducting thin film. The filter operates at a center frequency of 3950 MHz with a relative wideband of 15.19%, an insertion loss better than -1.4 dB, and out-of-band suppression exceeding -60 dB. The measured results show good agreement with the simulations.

Keywords

HTS Filter, Rectangular Coefficient, LaAlO_3 , DyBCO

Copyright © 2025 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 1986 年 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) 材料被发现以来, 超导材料的应用环境温度由液氮温区提升到液氮温区, 应用成本大幅降低[1]。而高温超导薄膜材料在微波滤波器方面的应用一直是许多学者研究的重点和热点。在射频和微波频段, 高温超导薄膜材料的微波表面电阻比传统金属材料低 2 到 3 个数量级。用高温超导薄膜材料可以制作出传统材料难以实现的高陡度、低损耗的高性能滤波器。尤其是 DyBCO, 它具有更为优异的性能, 化学稳定性更好。它的临界转变温度比 YBCO 高约 2 K, 更适用于超导微波器件的应用[2] [3]。

实现极陡带边滤波器的方法主要有两种。其一是在耦合结构中引入传输零点, 例如借助源负载耦合或混合耦合机制。文献[4]-[6]采用源负载耦合, 于通带边缘形成传输零点, 从而提高了带边陡度, 但该方法在远带抑制方面表现较差。文献[7]则利用混合耦合产生传输零点, 也可增强带边陡度, 但其实现受谐振器结构限制, 且设计流程较为复杂。其二是增加谐振器数目, 如[8]-[11]中采用多谐振器结构实现带通滤波, 以提升带边陡度。然而, 若使用常规材料或元件, 由于品质因数(Q 值)较低、损耗较大, 难以实现高阶滤波器, 导致整体选择性较差。若强行增加谐振器数量, 又会引起插入损耗显著上升, 因而传统材料难以用于制备具有极陡带边的滤波器。高温超导薄膜因其极低的微波表面电阻, 为实现极低插损的极陡带边滤波器提供了可能。

针对上述需求, 本文设计了一款工作在 C 波段的 22 阶高温超导宽带滤波器。该滤波器的中心频率设定为 3950 MHz, 通带宽度为 900 MHz。在设计过程中, 首先对滤波器进行了 22 阶拓扑结构的理论综合; 随后详细分析了谐振器间耦合与外部馈电耦合机制, 并完成了整体性能仿真; 最后完成了器件的制备与测试。

2. 22 阶超导滤波器的理论综合

本工作的设计目标:

中心频率: 3950 MHz

带宽: 900 MHz

插入损耗: 小于 1.5 dB

矩形系数($\text{BW}_{-60\text{dB}}/\text{BW}_{-1\text{dB}}$): 小于 1.2

带外抑制: 小于 -60 dB

为满足既定指标要求,本次设计选用经典的切比雪夫滤波器结构,成功设计出一款 22 阶带通滤波器,其等效电路布局如图 1 所示。根据切比雪夫滤波器的设计理论与规范化流程,结合主要技术指标,确定了该带通滤波器的基本电路参数[12]。此外,借助专业设计软件进行辅助计算,并对滤波器性能进行全面优化,最终得到如图 2 所示的 22 阶带通滤波器理论频率响应曲线。

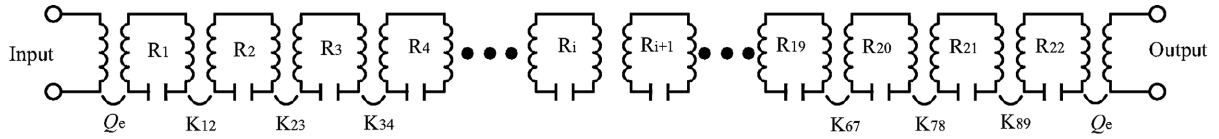


Figure 1. Equivalent circuit of the filter
图 1. 滤波器的等效电路

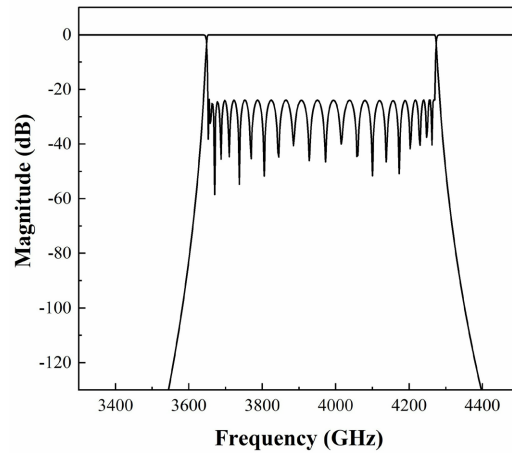


Figure 2. The theoretical frequency response curve of the filter
图 2. 滤波器理论频率响应曲线

同时由综合优化后的等效电路元件参数,由式(1),(2)计算得到带通滤波器的理论耦合系数矩阵,以及输入或输出外部品质因数 Q_e :

$$K_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (1)$$

$$Q_{ei} = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad Q_{eo} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & K_{1,2} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{2,1} & 0 & K_{2,3} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{3,2} & 0 & K_{3,4} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{4,3} & 0 & K_{4,5} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{5,4} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & K_{19,20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{20,19} & 0 & K_{20,21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & K_{21,20} & 0 & K_{21,22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & K_{22,21} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $K_{1,2} = K_{2,1} = 0.1389$, $K_{2,3} = K_{3,2} = 0.0996$, $K_{3,4} = K_{4,3} = 0.0904$, $K_{4,5} = K_{5,4} = 0.0877$, $K_{5,6} = K_{6,5} = 0.0859$, $K_{6,7} = K_{7,6} = 0.0852$, $K_{7,8} = K_{8,7} = 0.0846$, $K_{8,9} = K_{9,8} = 0.0839$, $K_{9,10} = K_{10,9} = 0.0835$, $K_{10,11} = K_{11,10} = 0.0832$, $K_{11,12} = K_{12,11} = 0.083$, $K_{12,13} = K_{13,12} = 0.0832$, $K_{13,14} = K_{14,13} = 0.0835$, $K_{14,15} = K_{15,14} = 0.0839$, $K_{15,16} = K_{16,15} = 0.0846$, $K_{16,17} = K_{17,16} = 0.0852$, $K_{17,18} = K_{18,17} = 0.0859$, $K_{18,19} = K_{19,18} = 0.0877$, $K_{19,20} = K_{20,19} = 0.0904$, $K_{20,21} = K_{21,20} = 0.0996$, $K_{21,22} = K_{22,21} = 0.1389$ 。输入外部品质因数和输出外部品质因数是 5.021。

式中, FBW 是滤波器的相对带宽。 g_i 为切比雪夫低通原型相应第 i 个元件的电导参数值。 $K_{i,i+1}$ 、 Q_{ei} 和 Q_{eo} 分别为相邻谐振器的耦合系数、输入端口的 Q 值与输出端口的 Q 值。

3.22 阶超导滤波器的设计

基于前文提取的滤波器耦合矩阵参数, 可进一步指导其物理电路的具体设计。该过程中, 谐振器数目、衬底性能以及超导电路的制备工艺均会显著影响滤波器的频率响应。在超导滤波器常用的介质基片中, MgO 、 $LaAlO_3$ 和 Al_2O_3 应用较为广泛。然而, MgO 基片硬度较低, 且易发生潮解; Al_2O_3 基片则存在各向异性的问题。综合设计需求, 本研究选用 3 英寸 $LaAlO_3$ 作为衬底材料, 该材料具有较高的介电常数, 有助于实现更小尺寸的谐振器, 对滤波器的小型化设计具有重要意义。

滤波器整体物理电路采用半波长谐振器并联耦合结构。谐振器选用发夹形设计, 该结构具有形式简单、稳定性好、符合本设计需求等特点, 其具体形式如图 3 所示。而相较于其他谐振器, 如采用直线型谐振器, 虽然结构简单便于制作, 但该结构在整体布局中尺寸过长, 且不满足本设计强耦合的需求。



Figure 3. The structure of resonator of the filter
图 3. 谐振器结构

依据耦合参数理论进行高温超导滤波器的物理电路设计。滤波器的微带电路的衬底为 0.5 mm 厚度的 $LaAlO_3$, 其介电常数为 23.5。半波长谐振器长度由(4)式确定:

$$L = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

式中 c 表示电磁波在自由空间中的传播速度, f_0 表示滤波器的中心频率, ϵ_{eff} 表示衬底的介电常数。

在确定谐振器的结构和尺寸之后, 需要确定谐振器之间的距离和外部端口的位置。当谐振器沿水平方向排列形成滤波器时, 有两种耦合方式, I 型和 II 型, 如图 4 所示。为了研究这两种耦合方式的差异, 使用全波电磁仿真软件对这两种耦合方式进行模拟。图 5 展示了两种耦合方式的距离与耦合系数的关系。由图 5 可以明显看出, 在 0.18~0.25 mm 的间距下, I 型的耦合系数始终小于 II 型的耦合系数, 且 I 型的

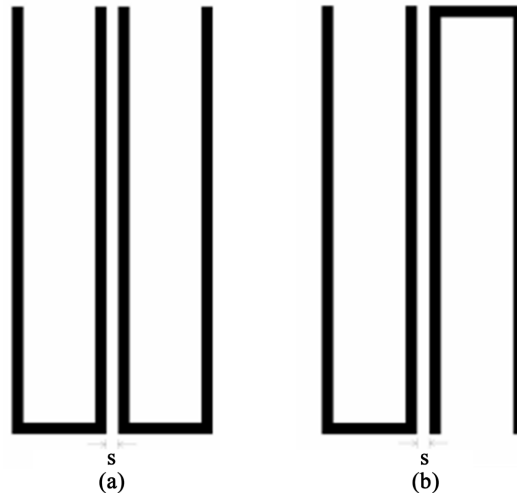


Figure 4. Two types of coupling for resonators
图 4. 谐振器的两种耦合方式

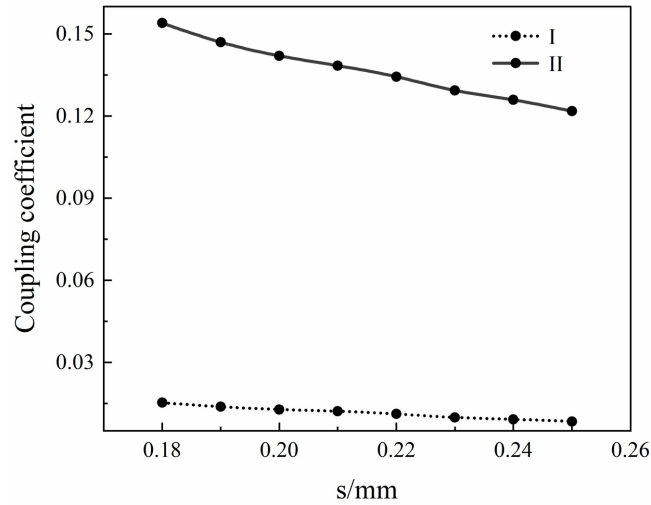


Figure 5. Coupling coefficient versus s
图 5. 耦合系数与距离的关系

耦合系数始终小于 0.02。图 6 是相同距离的两种耦合方式的频率响应曲线。从图 6 中可以看出，II 型比 I 型的耦合更强。由此可知，采用 II 型的耦合方式更有利于满足本设计的要求。

谐振器之间的距离由耦合系数决定。耦合系数由式(5)计算得出：

$$K_{1,2} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (5)$$

式中 f_1 , f_2 分别表示两个谐振器耦合时的谐振频率。调整相邻谐振器之间的距离 s 使耦合系数与理论值吻合，确定各个谐振器间的距离。

无论是磁耦合还是电耦合，耦合强度通常随着谐振器之间距离的增加而急速衰减。相邻谐振器距离最近，因此耦合最强。隔一个谐振器后，距离增加，耦合强度会下降一个甚至多个数量级。在本设计中，非相邻谐振器的耦合形式是 I 型，耦合强度较弱，且随着距离增大，耦合会更弱。因此本设计中非相邻谐振器间的交叉耦合对主耦合影响很小。

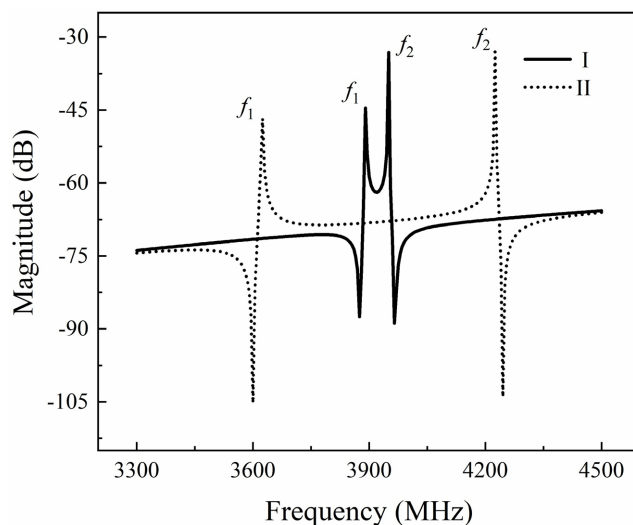


Figure 6. Comparison of the two coupling types

图 6. 两种耦合方式的对比

滤波器输入或输出端口的位罝由外部品质因数决定。根据本工作的指标要求，采用直接激励微带结构，这种结构能够增大外部输入馈线与第一个谐振器之间的耦合，更有利于满足本设计的要求。滤波器外部耦合的模拟频率响应曲线如图 7 所示。 Q_e 值通过(6)式计算得出：

$$Q_e = \frac{f_0}{BW_{-3dB}} \quad (6)$$

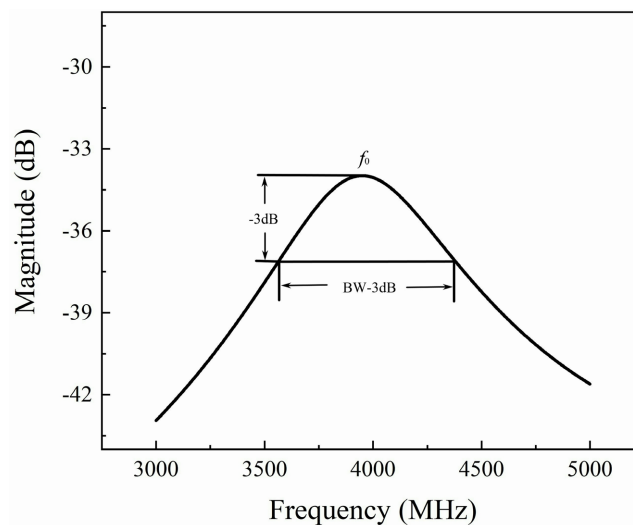


Figure 7. Frequency response curve of Q_e

图 7. 外部品质因数频率响应曲线

其中， f_0 是滤波器的中心频率。 BW_{-3dB} 为耦合曲线的 -3 dB 带宽。通过调整输入或输出馈线的位置，使实际 Q_e 值与理论值吻合，确定滤波器输入或输出端口的位罝。

经过上述设计步骤，可得到滤波器的初步物理结构。由于寄生效应会显著影响电路性能，初步仿真结果与理论响应之间存在明显偏差。因此，需对整体电路进行精细化调整与优化，以确定最终电路方案

(图 8 所示), 并获得符合设计指标的仿真响应曲线(图 9 所示)。该 22 阶超导滤波器的相对带宽为 15.19%, 回波损耗为-23.84 dB, 插入损耗优于-0.05 dB, 矩形系数低于 1.2, 阻带抑制超过-85 dB。通过整体物理布局的优化, 在阻带引入了寄生传输零点, 显著提高了带外滚降速率, 最终设计结果满足预期指标要求。

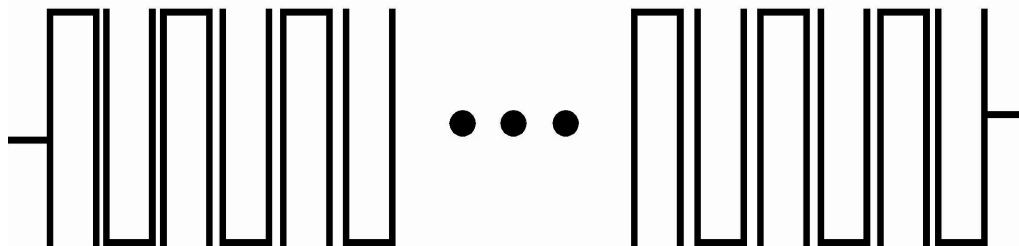


Figure 8. Physical circuit structure of the filter

图 8. 滤波器的物理电路结构

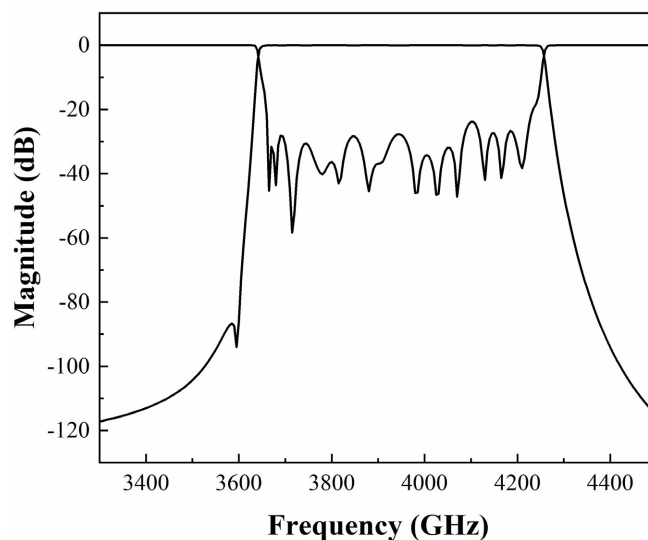


Figure 9. Frequency response curve of the filter

图 9. 滤波器的频率响应曲线

4. 22 阶超导滤波器的制备与测试

本实验将所设计的高温超导滤波器制备在 3 英寸双面 DyBCO 超导薄膜上。由于谐振器数量较多, 超导薄膜的均匀性及加工精度对滤波器性能具有重要影响。为此, 采用多源热共蒸发工艺外延生长高温超导薄膜, 以改善其均匀性。该超导薄膜厚度为 600 nm, 微波表面电阻 R_s 低于 $0.5 \text{ m}\Omega$, 平均临界电流密度 J_c 超过 2.5 MA/cm^2 。在滤波器电路制备方面, 采用半导体平面工艺进行精细加工, 尤其通过离子束刻蚀技术提升图形精度, 将电路加工误差控制在 $\pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ 以内, 从而降低制作偏差对性能的影响, 提高测试结果与设计预期的一致性。

完成组装后, 滤波器在低温真空测试系统中使用 Agilent 8753ES 矢量网络分析仪进行性能表征。在 77 K 工作温度下, 滤波器的测试结果如图 10 所示: 中心频率为 3950 MHz, 相对带宽为 15.19%。因滤波器需进行微调, 调谐螺钉及两个 SMA 接头均会引入额外损耗, 最终测得插入损耗优于-1.4 dB, 回波损耗低于-11 dB, 矩形系数为 1.157, 带外抑制优于-60 dB, 输入输出阻抗为 $50 \text{ }\Omega$ 。测试响应与仿真结果吻合良好, 达到了较为理想的设计目标。

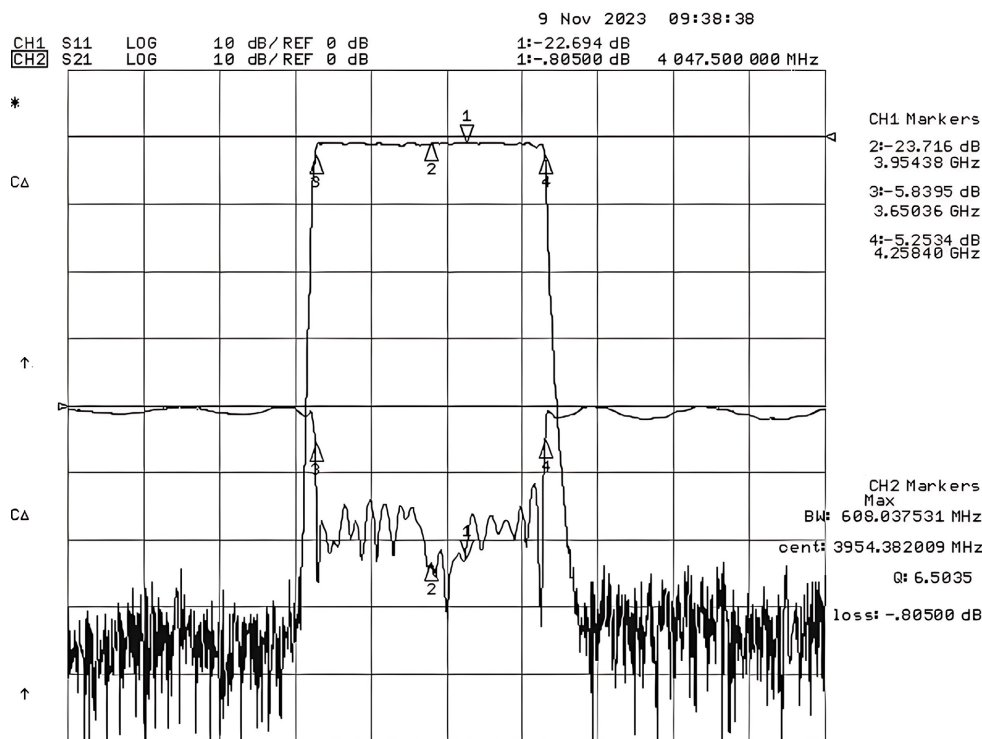


Figure 10. Measured results of the HTS filter

图 10. 高温超导滤波器实测结果

5. 结论

本研究攻克了带边滚降极为陡峭的宽带高温超导滤波器在设计与制备中的关键技术难题，成功设计并制备出一款 22 阶高温超导滤波器，其矩形系数小于 1.2。文中详细给出了滤波器的等效电路、理论响应曲线、耦合矩阵、设计流程、仿真及实测结果。要实现性能优异的宽带超导滤波器，稳定的结构设计是关键前提，均匀的超导薄膜材料是重要基础，而精密的微加工工艺则是核心保障。除因调谐螺钉和 SMA 接头引入的插入损耗略大之外，滤波器的带外抑制及带边滚降等实测结果与仿真吻合度较高，整体性能符合设计预期，验证了该超导滤波器在实现极高带边滚降方面的可行性。

参考文献

- [1] Krupka, J., Judek, J., Jastrzębski, C., Ciuk, T., Wosik, J. and Zdrojek, M. (2014) Microwave Complex Conductivity of the YBCO Thin Films as a Function of Static External Magnetic Field. *Applied Physics Letters*, **104**, Article 102603. <https://doi.org/10.1063/1.4868305>
- [2] Honma, T., Sato, S., Sato, K., Watanabe, M., Saito, A., Koike, K., et al. (2013) Microwave Surface Resistance of YBCO Superconducting Thin Films under High DC Magnetic Field. *Physica C: Superconductivity*, **484**, 46-48. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.03.035>
- [3] Semerad, R., Knauf, J., Irgmaier, K. and Prusseit, W. (2002) RE-123 Thin Films for Microwave Applications. *Physica C: Superconductivity*, **378**, 1414-1418. [https://doi.org/10.1016/s0921-4534\(02\)01735-5](https://doi.org/10.1016/s0921-4534(02)01735-5)
- [4] Peng, Y., Zhang, L., Zheng, Z. and Leng, Y. (2017) High Selective Compact Dual-Band Filter Using Ring Resonator with Quarter-Wavelength Stubs. *Electronics Letters*, **53**, 1589-1591. <https://doi.org/10.1049/el.2017.3451>
- [5] Cui, J., Chang, H. and Zhang, R. (2020) High Selectivity Slot-Coupled Bandpass Filter Using Discriminating Coupling and Source-Load Coupling. *Applied Sciences*, **10**, Article 6807. <https://doi.org/10.3390/app10196807>
- [6] Anwar, M.S., Cao, Q. and Burney, S.A. (2019) High Selectivity Quarter-Wavelength Resonator Bandpass Filter Utilizing Source-Load Coupling. *Microwave and Optical Technology Letters*, **62**, 1176-1182. <https://doi.org/10.1002/mop.32171>

-
- [7] Killamsetty, V.K. and Mukherjee, B. (2019) Compact Triple Band Bandpass Filters Design Using Mixed Coupled Resonators. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, **107**, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.03.005>
 - [8] Huang, C., Fang, W. and Lin, Y. (2018) Miniaturization of Broadband Stub Bandpass Filters Using Bridged-T Coils. *IEEE Access*, **6**, 20164-20173. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2818938>
 - [9] Yousefi, M., Aliakbarian, H. and Sadeghzadeh, R. (2016) Design and Integration of a High-Order Hairpin Bandpass Filter with a Spurious Suppression Circuit. 2015 *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, 2-3 November 2015, 1-4. <https://doi.org/10.1109/lapc.2015.7366036>
 - [10] Hao, Z., Zha, H., Kong, F., Gao, L. and Wang, J. (2018) Self-Packaged Miniature High-Order Bandpass Filter for Wide-band Applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **28**, e21546. <https://doi.org/10.1002/mmce.21546>
 - [11] Wu, X., Li, Y. and Liu, X. (2019) High-Order Dual-Port Quasi-Absorptive Microstrip Coupled-Line Bandpass Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **68**, 1462-1475.
 - [12] Cameron, R.J. (1999) General Coupling Matrix Synthesis Methods for Chebyshev Filtering Functions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 433-442. <https://doi.org/10.1109/22.754877>