文章编号: 1007 - 4252(2022)01 - 0001 - 029

可重构高温超导滤波器的研制

季来运*
(天津海泰超导电子有限公司,天津 300384)

摘要: 本工作基于高温超导薄膜材料镝钡铜氧(DyBCO)和电可调电容技术,设计开发了工作于甚高频(VHF)频段的五阶可重构超导带通滤波器和超导带阻滤波器。采用协同仿真的设计方法,给出了两种设计方案的等效电路、理论曲线、物理电路的设计过程和可重构超导滤波器的仿真结果,最后给出了实际测试曲线。测试结果表明: 可重构超导带通滤波器的可调频率范围为 235 ~ 250 MHz,通带带宽为 0.7 MHz,带外抑制度大于 70 dB; 可重构超导带阻滤波器的可调频率范围为220 ~ 267 MHz,阻带带宽为 1.0 MHz,通带损耗小于 0.1 dB。

关键词: 可重构滤波器; 高温超导薄膜; 可变电容器
中图分类号: TN713　　**文献标志码:** A

Design and performance of reconfigurable high temperature superconducting filters

JI Lai-yun*
(Tianjin Hi-Tech Superconducting Electronic Co., Ltd, Tianjin 300384, China)

Abstract: Based on the high temperature superconducting (HTS) thin film material DyBCO and electrically tuning varactor, 5-pole reconfigurable superconducting band-pass filter and superconducting band-stop filter working in very high frequency (VHF) band have been designed and developed. The equivalent circuit, theoretical curve, layout design process of the two filters are presented by using the collaborative simulation method. Finally, the simulation results and the actual test curves of the reconfigurable superconducting filter are given. The results show that: (1) the adjustable frequency range of reconfigurable superconducting band-pass filter is 235 ~ 250 MHz, and the bandwidth is 0.7 MHz, out-of-band rejection is more than 70 dB; (2) the adjustable frequency range of the band-stop filter is 220 ~ 267 MHz, and the stopband width is 1.0 MHz, the passband loss is less than 0.1 dB.

Key words: Reconfigurable filter; High temperature superconducting film; Tuning varactor

收稿日期: 2022-01-22;　　**修订日期:** 2022-02-14
作者简介: 季来运(1973-),男,山东郓城人,正高级工程师,主要研究方向为高温超导薄膜材料制备技术、超导微波器件设计与应用技术开发(E-mail: jilaiyun@163.com).

0 引言

随着无线通信系统的迅猛发展，空间电磁频谱日益密集，通信设备之间的干扰越来越严重，无线通信环境越来越恶劣。而且同一无线通信设备需要满足多种不同工作频段的应用要求和通信模式，各个频段需要采用不同的滤波器来进行频带的选择。因此人们希望用单个可重构滤波器代替传统的滤波器组，去除冗余的射频器件，精简射频前端结构，减小损耗。目前可重构滤波器已经成为国内外电磁领域研究的一个热点。可重构带通滤波器可以灵活调整设备的工作频率，充分利用无线频率资源，提高设备的无线环境适应性；而可重构带阻滤波器则可以随时滤除设备工作的无线环境中的非预期干扰信号，提升设备的抗干扰能力[1-3]。

高温超导材料的微波电阻比传统金属材料小3个数量级左右，利用超导薄膜制作的超导滤波器具有插入损耗极小、过渡带陡峭、带外抑制高的特点。近年来国内的科研院所和专业公司已经成功研制多种满足极苛刻技术指标要求、具有国际一流技术水平的超导滤波器产品[4-5]。

随着微加工技术、超导材料等学科的发展，目前国内外已经将超导材料应用于可重构滤波器的开发，并取得一定的研究成果。Sekiya 等人[6]采用 π 型波导结构开发了三阶带宽可重构超导滤波器，工作频率为 5.17 GHz，实现了带宽 80 MHz 的可调。清华大学 Suo 等人[7]采用变容管设计了带宽为 23.8 MHz的二阶可重构超导滤波器，中心频率在 924.5～1 030.8 MHz 可调，插损为 1.41 dB。物理所 Li 等人[8]研制了相对带宽约为 3%的可调带通超导滤波器，中心频率调节范围为 430～720 MHz，插损为 3.8 dB。Wang 等人[9]设计了可调带阻超导滤波器，中心频率调节范围为 286～485 MHz，阻带抑制深度为 26～70 dB，-3 dB 阻带带宽为 6.9～7.9 MHz。从目前研究现状来看，高性能可重构超导滤波器的实现还是比较困难，多数可重构超导滤波器设计阶数较低，带宽较宽，距离高性能指标要求还有一定距离。相信随着材料、设计、工艺等方面技术的新突破，可重构超导滤波器将会在认知无线电、雷达、电子对抗以及相关军用、民用系统设备中发挥重要的作用，具有极其广泛的应用前景。

1 可重构超导带通滤波器

可重构超导带通滤波器要求中心工作频率为 242.5 MHz，可调频率范围为 235～250 MHz，通带宽度为 0.7 MHz，阻带抑制大于 70 dB。

1.1 超导带通滤波器理论设计

本工作的设计思路是基于切比雪夫原型的五阶带通滤波器，谐振器为电容加载的半波长微带结构，滤波器整体采用谐振器平行耦合结构，滤波器的频率可重构通过可变电容器件的电容值变化来实现。五阶带通滤波器的等效电路如图 1 所示。

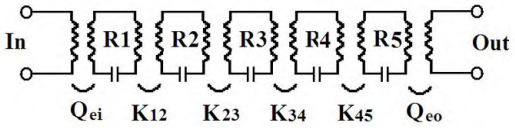


图 1 五阶带通滤波器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of 5-pole band-pass filter

结合滤波器的主要技术要求，利用切比雪夫滤波器的低通原型转换和设计方法，可以很方便地得到五阶滤波器的基本电路参数[10]。

滤波器相邻谐振器间的耦合系数和外部品质因数由公式(1)和公式(2)给出：

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

$$Q_{ei}=\frac{g_0 g_1}{FBW} \qquad Q_{eo}=\frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \tag{2}$$

其中 FBW 是滤波器相对带宽，$K_{i,i+1}$ 代表第 i 个与第 $i+1$ 个谐振器间的耦合系数，Q_{ei} 和 Q_{eo} 分别代表滤波器输入端和输出端的外部品质因数，g_i 和 g_{i+1} 分别代表切比雪夫低通滤波器原型中第 i 个和第 $i+1$ 个电导参数，$n=5$ 为滤波器阶数。

为进一步提升滤波器的设计性能指标，在各参数初始值的基础上，通过设计软件，进行滤波器的综合优化，得到如图 2 所示的五阶带通滤波器理论曲线，其中黑色实线为滤波器的传输特性，黑色虚线为反射特性。在各谐振器耦合系数保持不变的情况下，仅仅变更谐振器的谐振频率，同样可以得到其对应的理论曲线，分别如图 2 中的蓝色曲线和红色曲线所示，可以看到，结果只是滤波器的工作频率发生变化，而其频域特性仍然保持非常理想的状态，同时随频率的升高，其通带宽度会随之增加，相对带宽保

持不变。

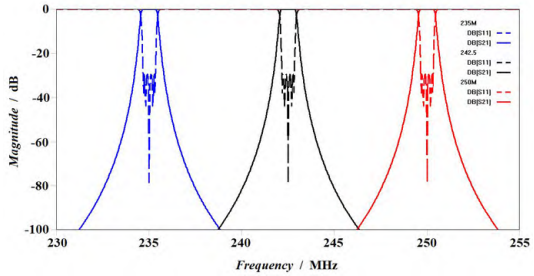


图 2　可重构带通滤波器理论曲线

Fig.2 Theoretical response curve of reconfigurable band-pass filter

由滤波器综合优化后的电路参数可提取得到五阶带通滤波器的耦合系数矩阵，以及滤波器外部品质因数 Q_{ei} 和 Q_{eo}。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.00225457 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00225457 & 0 & 0.001520094 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001520094 & 0 & 0.001520094 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001520094 & 0 & 0.00225457 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00225457 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_{ei} = Q_{eo} = 325.6057469$$

$$f_0 = 242.5\ \text{MHz}$$

1.2　超导带通滤波器电路设计仿真

由于滤波器工作频率较低，设计采用 2 英寸 0.5 mm厚度的铝酸镧($LaAlO_3$) 作为衬底，其介电常数取 23.75。

为减小滤波器的物理电路尺寸，谐振器采用对称多折线结构，无电容加载情况下谐振器长度由公式(3) 计算:

$$L = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \tag{3}$$

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，ε_{eff} 为微带电路衬底有效介电常数。

为实现滤波器工作频率的可重构，在半波长谐振器的两端进行可变电容加载。可变电容的引入会进一步缩短谐振器的长度，同时使谐振器具备频率可重构的特性，谐振器结构如图 3(a) 所示。

电容加载谐振器的工作频率由公式(4) 给出:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0(2C_r + C_0)}} \tag{4}$$

其中 C_r 为可变电容的电容值，L_0 为谐振器微带电路的总电感值，C_0 为谐振器微带电路的总电容值，谐振器的工作频率 f_r 将随可变电容元件的电容值 C_r 的变化而变化，从而实现滤波器工作频率可重构的设计要求。

以滤波器的耦合矩阵参数为理论依据，采用协同仿真技术，通过耦合系数确定相邻谐振器间距，通过外部品质因数确定滤波器输入输出馈线的位置，进而搭建出整体物理电路，其设计过程已经非常成熟，本文不再赘述[11]。

由以上的步骤可以得到所设计滤波器的初步物理电路结构，由于所设计的带通滤波器带宽较窄，偏置电压的引入以及电路结构非预期寄生效应的存在，对窄带滤波器的性能影响较大，所以滤波器的初步仿真结果也会和理论响应曲线存在一定差距，因此需要对整个滤波器电路进行结构微调和优化，进而确定滤波器的最终电路结构，如图 3(b) 所示。在仿真过程中，我们将微带电路设置为理想导体，将可变电容设置为理想元件。在微带电路保持不变的情况下，通过调整可变电容器件的电容值(其值由 1.5 pF 增大至 2.94 pF) ，可得到不同频率的仿真曲线，即可重构带通滤波器的理想仿真结果，如图 4 所示。

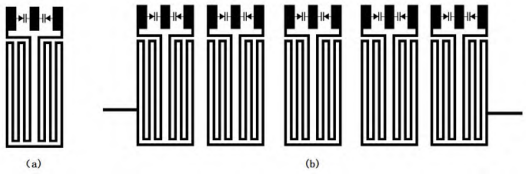


图 3　谐振器及滤波器电路结构示意图 (a) 电容加载谐振器; (b) 五阶带通滤波器

Fig.3 Schematic diagram of resonator and filter (a) Resonator loaded tuning varactor; (b) 5-pole band-pass filter

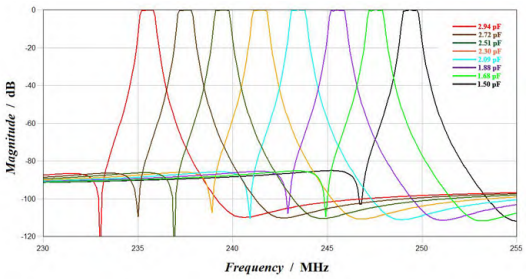


图 4　可重构带通滤波器仿真结果

Fig.4 Simulation results of reconfigurable band-pass filter

从仿真结果可以看到，带通滤波器工作频率随

电容值的减小而升高，带宽也略有增大，滤波器可以实现 235～250 MHz 范围的频率连续可调，插入损耗小于 0.1 dB，阻带抑制可达 80 dB 以上。同时，由于物理电路整体布局的调整安排，滤波器在低端阻带产生了寄生传输零点，有效提升了滤波器低频侧的带边陡度，设计结果达到了预期值。

1.3 超导带通滤波器制作测试

制作可重构超导滤波器电路的双面超导薄膜材料镝钡铜氧（$DyBa_2Cu_3O_7$）采用多源热共蒸技术制备得到，提升了超导薄膜的均匀性，其厚度为 600 nm，微波表面电阻 R_s 小于 0.5 mΩ。微带电路采用半导体平面精细加工工艺技术制作，经过涂胶、曝光、显影、离子束刻蚀、划片等过程，得到超导滤波器电路芯片。完成超导芯片、标准 SMA 接头、偏置电压引线、铜质屏蔽盒的整体装配后，采用安捷伦公司的矢量网络分析仪 8753ES 进行射频性能测试。超导滤波器由斯特林制冷机进行制冷，在工作温度为 70 K 时，通过调整可变电容的偏置电压来改变电容值，得到滤波器相对应的一组频率响应曲线，如图 5 所示。

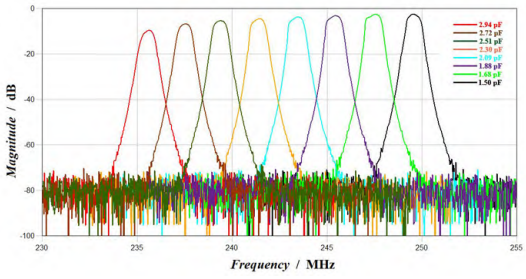


图 5 可重构超导带通滤波器测试结果

Fig.5 Measured result of reconfigurable band-pass filter

由测试结果可见，滤波器实现了在 235～250 MHz 范围内频率连续可调的性能，带宽保持在 0.7±0.2 MHz，滤波器阻带抑制大于 70 dB，滤波器传输特性曲线与设计结果吻合。滤波器插入损耗实际测试结果为 2.51～9.64 dB，采用倒推拟合的方法来估算谐振器的品质因数，可以得到如表 1 的结果。

表 1 不同频率下谐振器品质因数

Table1 Q valueof resonator at different operating frequencies

频率(MHz)	插损(dB)	品质因数
249.6	2.51	4 600
247.5	2.72	4 200
245.4	3.29	3 500
243.3	3.83	2 950
241.2	4.56	2 450
239.1	5.46	2 050
237.5	6.85	1 600
235.6	9.64	1 120

从上表数据可以看到，在滤波器的插入损耗为 9.64 dB 时，谐振器的品质因数仍然高于 1 000，所以损耗较大的原因是滤波器带宽属于窄带，与所采用的可变电容器件与超导薄膜材料相比其 Q 值不够高所致。

2 可重构超导带阻滤波器

可重构超导带阻滤波器要求频率为 243.5 MHz，可调频率范围为 223.5～263.5 MHz，阻带宽度为 1.0 MHz，阻带抑制大于 40 dB。

2.1 超导带阻滤波器理论设计

设计思路是基于切比雪夫原型的五阶带阻滤波器，谐振器为电容加载的半波长微带结构，滤波器整体采用谐振器与主传输线依次耦合结构。滤波器的频率可重构通过可变电容器件的电容值变化来实现。每个谐振器的谐振频率完全相同，相邻两个谐振器之间的主传输线长度是 1/4 波长[12]。带阻滤波器的电抗斜率参数依据公式(5)计算得出：

$$X_i=\omega_i\cdot L_i=1/(\omega_i\cdot C_i)=Z_0\cdot g_0/(g_i\cdot FBW)\quad (i=1\ \text{to}\ n) \tag{5}$$

其中，$\omega_i=\omega_0$ 是滤波器的中心角频率，FBW 是带阻滤波器的相对带宽，g_i 为切比雪夫低通原型相应第 i 个元件的电导参数值，$n=5$ 为滤波器阶数，Z_0 为传输线的特性阻抗。

电抗斜率参数与带阻滤波器的中心频率之间关系由公式(6)计算得出：

$$X_i/Z_0=f_0/(2\cdot\triangle f_{i3dB})\quad (i=1\ \text{to}\ n) \tag{6}$$

其中，f_0 是带阻滤波器中心频率，$\triangle f_{i3dB}$ 是 −3 dB 处带宽。

按照切比雪夫带阻滤波器的综合设计理论，给出五阶带阻滤波器的等效电路，如图 6 所示。

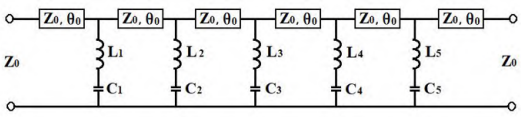


图 6　五阶带阻滤波器等效电路图

Fig.6 Equivalent circuit of 5-pole band-stop filter

在电路初始参数基础上，通过设计软件对带阻滤波器进行综合优化，得到如图 7 所示的五阶滤波器理论曲线，其中黑色实线为滤波器的传输特性，黑色虚线为反射特性。在滤波器各谐振器与主传输线的耦合关系保持不变的情况下，仅变更谐振器的谐振频率，可得到相对应的滤波器理论曲线，选择低频率的 223.5 MHz 以及高频率的 263.5 MHz 两组数据，分别如图中的蓝色和红色曲线，可以看到，滤波器在频率变化时，其频域特性仍然保持非常理想的状态，而带宽同样遵循随频率的增高而略有增大的趋势。

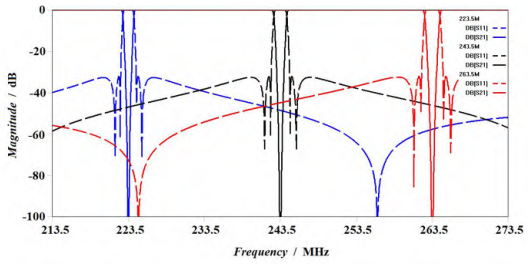


图 7　可重构带阻滤波器理论曲线

Fig.7 Theoretical response curve of reconfigurable band-stop filter

2.2　超导带阻滤波器电路设计仿真

带阻滤波器的设计同样采用铝酸镧($LaAlO_3$) 基片作为衬底，谐振器采用对称的 1/2 波长多折线结构，在谐振器的两端进行可变电容加载，使谐振器具备频率可重构的特性。可变电容的引入进一步缩短谐振器的长度，如图 8(a) 所示。

每两个谐振器之间的主传输线长度是 1/4 波长，受限于超导薄膜面积，需要设计适宜的传输线形式，本工作采用折线结构，如图 8(b) 所示，有效地解决了主传输线的长度问题，使整个滤波器可以排布于 2 英寸基片上。

在带阻滤波器理论设计中，各谐振器只与主传输线发生耦合作用，所以在电路设计中要尽可能地消除或者减弱谐振器之间的直接耦合。一种方法是物理上分离这些谐振器，如把每一个谐振器置于单独的金属盒中来隔离彼此之间的耦合，这样能够得到很好的效果，但是机械结构较复杂，同时会增加滤波器的尺寸[13]。本工作采用将谐振器依次通过曲折的主传输线进行隔离的方法，较好地减弱了谐振器之间的耦合效应。

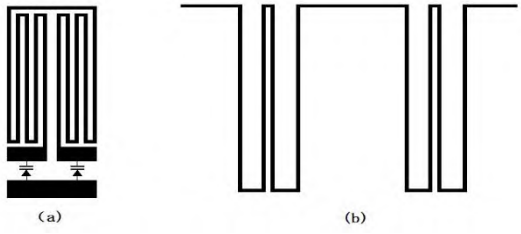


图 8　谐振器及主传输线结构示意图 (a) 电容加载谐振器; (b) 主传输线

Fig.8 Schematic diagram of resonator and transmission line (a) Resonator loaded tuning varactor; (b) Transmission line

谐振器及主传输线结构形式确定后，通过协同仿真技术，计算带阻滤波器主传输线与每个谐振器的耦合关系，仿真得到其频率响应曲线，通过调整各谐振器与传输线的相对位置，使得到的仿真数据与理论值一致，来最终确定各自的位置关系。

最后，搭建出五阶可重构超导带阻滤波器的整体物理电路，经过电磁场全波模拟仿真和微调优化，得到最终的仿真结果，完成带阻滤波器物理电路设计。如图 9 中黑色曲线所示，其中黑色实线为传输特性，黑色虚线为反射特性。在仿真过程中，同样将微带电路设置为理想导体，将可变电容设置为理想器件。在微带电路保持不变的情况下，通过调整可变电容器件的电容值，可以得到不同频率的仿真曲线，即可重构带阻滤波器的理想仿真结果，选择五组不同频率模拟仿真曲线，工作频率分别为 223.5 MHz、233.5 MHz、243.5 MHz、253.5 MHz、263.5 MHz，如图 10 所示。

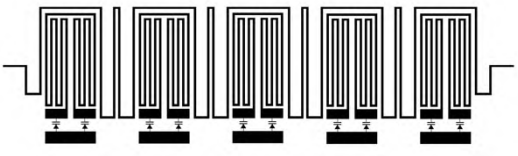


图 9　五阶可重构超导带阻滤波器电路结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of 5-pole reconfigurable band-stop filter

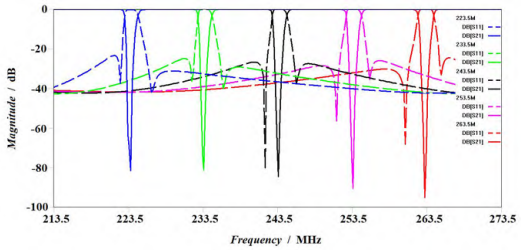
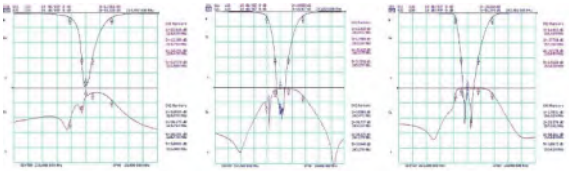


图 10 可重构超导带阻滤波器仿真曲线

Fig.10 Simulation results of reconfigurable band-stop filter

2.3 超导带阻滤波器制作测试

采用相同的标准工艺完成超导滤波器芯片的制作，以及超导芯片、屏蔽盒、射频接口、偏置电压引线装配。斯特林制冷机将可重构超导带阻滤波器降温至 70 K，用网络分析仪 8753ES 测试滤波器性能。通过调整偏置电压、改变可变电容的容值，可以实现滤波器工作频率的连续可调及滤波器频域特性的重构，选择三组不同工作频率的测试结果，如图 11 所示，其中图 11(a) 为带阻滤波器频率为 220 MHz 时的特性曲线，图 11(b) 为带阻滤波器频率为 243.5 MHz 时的特性曲线，图 11(c) 为带阻滤波器频率为 267 MHz 时的特性曲线。



(a) f_r = 220 MHz (b) f_r = 243.5 MHz (c) f_r = 267 MHz

图 11 可重构超导带阻滤波器测试结果

Fig.11 Measured result of reconfigurable band-stop filter

由滤波器测试结果可以看出，带阻滤波器可以在 220~267 MHz 频率范围内实现可重构，频率响应特性较理想，滤波器的阻带抑制均达到 45 dB 以上，阻带带宽会随频率的不同而有所差异，在工作频率为 220 MHz 时，阻带带宽为 0.76 MHz; 频率为 243.5 MHz 时，阻带带宽为 1.05 MHz; 频率为 267 MHz 时，阻带带宽为 1.26 MHz，与设计预期趋势一致。滤波器通带插入损耗小于 0.1 dB，实际测试的频域传输响应曲线与设计结果基本吻合。

3 结论

采用高温超导薄膜材料和电可调电容器件，设计了可重构超导带通滤波器和超导带阻滤波器。两种滤波器均基于经典设计方法和协同仿真技术完成，谐振器为末端加载可变电容的半波长微带结构，通过偏置电压的调整，加载电容容值的改变，引起谐振器频率的变化，使滤波器具备了频率可重构的特性。滤波器的实际测试结果表明，文章给出的可重构超导滤波器的设计方案切实可行，实现了在一定频率范围内的连续重构。研制的可重构高温超导滤波器已成功应用于系统设备中，有效解决了无线环境的干扰问题。

参考文献:

[1] 冯 靖. 几种电调微波滤波器的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学，2020.

[2] Psychogiou D，Gomez-Garcia R，Peroulis D. Fully- reconfigurable bandpass/stop filters and their coupling－matrix representation [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters，2016，26(1) : 22-24.

[3] Wang X，Xia F，Li N，et al. A YBCO/BST/MgO interdigital varactor and an L－band tunable HTS bandpass filter [C]. //IEEE Mtt-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for Rf and THz Applications. IEEE，2015: 1-3.

[4] 李春光，王 佳，吴 云，等. 中国超导电子学研究及应用进展 [J]. 物理学报，2021，1: 184-209.

[5] 季来运，高文斌，何立娟，等. 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，2013，8: 1058-1064.

[6] Sekiya N，Harada H，Nakagawa Y，et al. Design and fabrication of bandwidth tunable HTS transmit filter using π－shaped waveguides [J]. Physical C: Superconductivity and its Applications，2010，470(20) : 1499-1502.

[7] Suo G N，Guo X B，Cao B S，et al. Superconducting Varactor Tunable Filter With Constant Bandwidth Using Coupling Line [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters，2014，24(9) : 628-630.

[8] Li C G，Bian Y B，Li G Q，et al. A Tunable High Temperature Superconducting Bandpass Filter Realized Using Semiconductor Varactors [J]. 2014 IEEE Transactions Applied Superconductivity，2014，24(5) : 1501205.

[9] Wang J，Li C G，Wang X，et al. Varactor-Tuned Narrow-Band High Temperature Superconducting Notch Filter [J]. 2014 IEEE Transactions Applied Superconductivity，2014，24(5) : 1501104.

[10] 甘本祓，吴万春著. 现代微波滤波器的结构与设计

[M]. 北京: 科学技术出版社，1973: 11-56.

[11] Hong J S，Lancaster M J. Microstrip Filter for RF/Microwave Application [M]. A Wiley-Interscience Publication，2001: 235-272.

[12] Matthaei G L，Young L，Jones E M T. Microwave filters，impedance - matching networks，and coupling structures [M]. Artech House，Inc.，1980.

[13] Soares E R. Design and construction of High performance HTS pseudo-elliptic band-stop filter [C]. //IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest，1999: 1555 - 1558.