

一种结构紧凑的高温超导窄带带通滤波器

陈 静^{1,2} 孙 亮¹ 李顺洲^{1,3} 黄建冬¹
尹正朝¹ 何艾生¹ 李春光¹ 张雪强¹
黎 红¹ 罗 胜² 顾长志¹ 金爱子¹
杨海方¹ 冯 稷¹ 何豫生¹

¹ 中国科学院物理研究所, 北京 100080

² 北京科技大学物理系, 北京 100083

³ 中国科学院声学研究所, 北京 100080

研制了一种结构紧凑的高温超导窄带滤波器. 该滤波器中心频率为 , 是在以 0.5mm 厚的 LaAO_3 ($\epsilon_r \approx 24$) 为衬底的 YBCO 超导薄膜上制作的. 测试结果显示该滤波器具有比较好的性能. 其插入损耗 $< 0.3\text{dB}$, 反射损耗 $< -16\text{dB}$, 相对带宽 $< 9\%$, 带边陡度 $> 9\text{dB/MHz}$, 中心频率误差 $< 0.05\%$. 滤波器设计中, 利用特殊技术成功地改善了过渡带上的零点特性, 为今后研制新型的结构紧凑的滤波器开拓了思路.

关键词: 高温超导, 微波应用, 带通滤波器

PACC: 7470V, 7870G, 4280C

1 引 言

高温超导滤波器是当今高温超导电子学中最活跃的领域. 虽然受平面超导薄膜的局限, 绝大多数高温超导滤波器都采用了微带结构, 然而由于超导薄膜材料在微波领域中的优势, 超导滤波器在带内插损、带外抑制、带边陡度、以及带内起伏等重要指标上都超过了常规金属滤波器.

近年来超导平面谐振器得到了较快的发展, 产生了许多性能优良、拓扑结构新颖的谐振单元, 例如开环谐振器^[1]、J 型发卡谐振器^[2]、S 型谐振器^[3]等等. 利用这些谐振器研制的带通滤波器显示了极好的性能. 然而, 真正体现超导滤波器卓越品质的是相对带宽在以下的超导窄带滤波器. 微波理论指出滤波器的插损与带宽成反比, 与谐振器的 Q 值成正比. 就 Q 值而言, 用常规金属制成的谐振器比超导谐振器小 1 ~ 2 个数量级, 因此用金属材料制成的滤波器插损较大, 如果相对带宽在 3% 以下, 金属滤波器甚至不能形成完整的通带. 在这方面超导滤波器具有得天独厚的优势, 完全有可能把相对带宽做到 1% 以下. 德国的 Helmut Piel 等人 2002 年曾在北京报告, 他们利用两个串联的超导装置成功地研制成窄带滤波器,

其中心频率为 1954MHz ,相对带宽为 2.6‰^[4]. 此后 ,有更多的研究者接受挑战 ,投身窄带滤波器的研制.

我们研制成功一种相对带宽小于 9‰的超导窄带滤波器 ,由于只是用了一片面积为 35 × 17mm² 的 YBCO 双面薄膜 ,所以滤波器具有较小的体积 ,也具有较好的传输特性和反射特性.

2 窄带滤波器的设计

使用单位根据总体设计 ,向我们提出了滤波器的技术指标 ,如表 1 所示.

表 1 滤波器的技术指标

中心频率	通带宽度	带内插损	反射损耗	带内起伏	带外抑制	带边陡度
f_0/MHz	$\Delta f/\text{MHz}$	S_{21}/dB	S_{11}/dB	dB	dB	dB/MHz
1725	15	< 0.3	< - 15	< 0.3	< - 50	> 8

根据这一指标和超导滤波器的特性 ,我们选择切比雪夫(Chebyshev)函数作为初始设计的模式 ,并确定采用由八个单元谐振器组成的带通滤波器. 图 1 是经设计计算得到的理论曲线 ,该传输特性曲线反映出典型的切比雪夫函数的特征 ,同时也具有良好的反射性能.

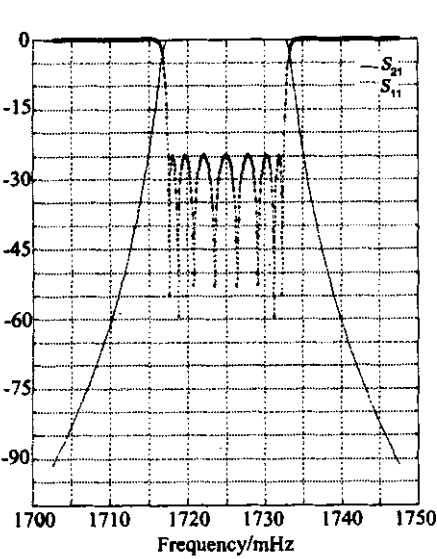


图 1 滤波器的理论曲线

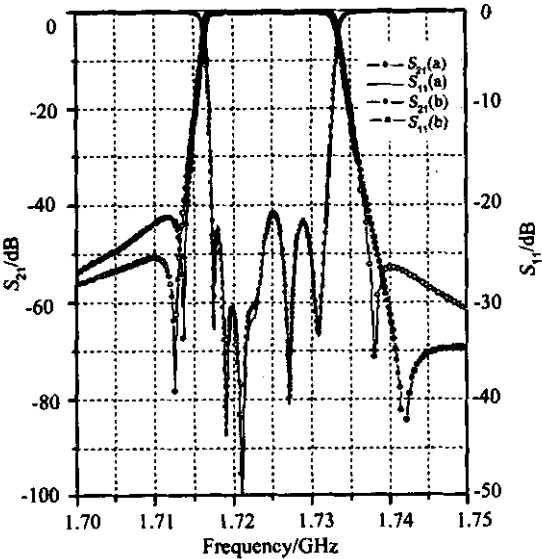


图 2 微调前后滤波器的仿真曲线

在进入仿真设计之前 ,重要的工作是选择好谐振单元. 我们要求谐振单元对外的电磁辐射要小 ,外形要紧凑 ,这样谐振单元可以形成紧凑的排列. 在诸多谐振器中 ,我们在夹型谐振器系列中选择了一种符合上述要求的拓扑结构.

计算机仿真工作是在 Agilent ADS 软件支持下进行的 ,仿真结果力求接近理论曲线 ,同时充分利用谐振单元间的电磁耦合 ,并采取特殊的辅助手段来克服由此带来的负面作用 ,使传输曲线出现准椭圆函数的特征. 图 2 是该滤波器的仿真曲线 ,与理论曲线相比较 ,二者的

带宽和中心频率是一致的,不同点在于在传输特性的高频端和低频端的过渡带产生了两个传输零点.显然,零点的出现提高了传输曲线边带的陡度.图 2 中的(a)是仿真的中间结果,它的 S_{21} 在带外低端明显地高于带外高端部分.我们对滤波器的拓扑结构的结构进行了适当的调整和优化.图中(b)是仿真的最后结果,可见,在对反射损耗几乎没有影响的情况下,曲线的不对称性得到了明显地改善.

3 滤波器的制作和特性测试

在 2 英寸的 YBCO 双面薄膜上经光刻生成滤波器的图形.所使用的超导薄膜是利用磁控溅射法生长在 LaAlO_3 表面上的,膜厚 700nm, LaAlO_3 基片厚约 $500\mu\text{m}$,在 YBCO 膜上原位沉积了金膜.超导膜的临界参数如下: $T_c > 89\text{K}$, $J_c > 10^6\text{A}/\text{cm}^2$, $R_s < 0.6\text{m}\Omega$. 用干法将图形外的超导膜和金保护膜蚀蚀去.这样做成了一个尺寸是 $35 \times 15\text{mm}$ 的八单元窄带带通滤波器.

滤波器的检测和调谐是在液氮环境下进行的.测量使用了 HP8510C 网络分析仪,经过全两端口校准后实施了精密测量,全部结果见图 3.实测结果表明,实测的传输曲线与仿真曲线大体相同,但在反射曲线上二者相差较明显,这是由于基片和超导膜的不均匀性造成的.经过对滤波器的反复调谐,使传输与反射曲线的缺陷获得改善.实测数据见表 2.

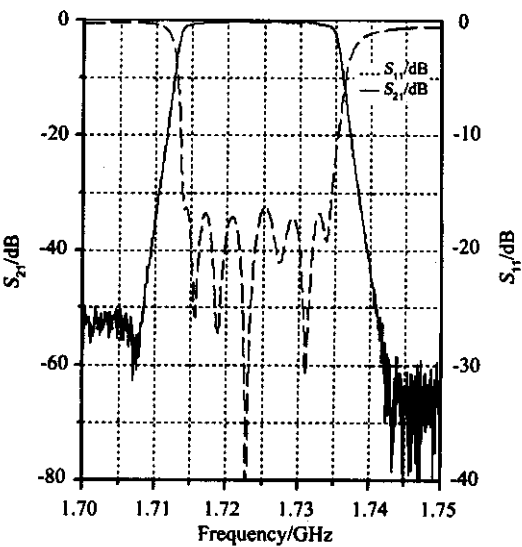


图 3 滤波器的测试结果

表 2 实测数据

中心频率 f_0/MHz	通带宽度 $\Delta f/\text{MHz}$	带内插损 S_{21}/dB	反射损耗 S_{11}/dB	带内起伏 dB	带外抑制 dB	带边陡度 dB/MHz
1724.2	18	< 0.3	< -16	< 0.3	< -50	> 9

4 讨论与结论

实测的中心频率只比设计值低了约 0.8MHz,对应的相对误差为 0.046%,与指标值符合得相当好.通带宽度比设计值高出 3MHz 是由多方面原因造成的,根据仿真测算,如果基片厚度增加 $10\mu\text{m}$,那么带宽将增加 10%.对基片某些区域实测表明,基片平均厚约 0.52mm,而理论计算与仿真都是假定基片的厚度为 0.50mm.厚度的差异直接影响到频率与带宽.如果考虑到畴的影响,各处厚度可能不尽相同,那么情况就变得复杂化了.

实验结果表明,滤波器的上边带陡度为 9.5dB/MHz,下边带陡度为 9dB/MHz,均超过指标值,这是因为在实测曲线和仿真曲线上都形成了两个零点,使得它们具有了准椭圆函数的

特性.从而使边带陡度比理论值有所提高.从实测结果看带外抑制无论在高端还是在低端均优于仿真值.

实测的反射损耗(S_{11})在带内均在 -16dB 以下,证明该滤波器具有良好的反射特性.

总之,该高温超导窄带带通滤波器与仿真结果符合得较好,指标已达到了很先进的水平.利用特殊技术改善过渡带上的零点是一次成功的尝试,为今后研制新型的结构紧凑的滤波器开拓了思路,对今后超导滤波器设计规范,以及进一步研制通带更窄的滤波器提供了有益的经验.

[1] Jia-Sheng Hong , Michael J. Lancaster , Dieter Jedamzik , Robert B. Greed , and Jean-Claude Mage , *IEEE Transactions MTT* , **48**(7)(2000) , 1240 .
[2] Genichi Tsuzuki , Masanobu Suzuki , and Nobuyoshi Sakakibara , *IEEE Transactions MTT* , **48**(12)(2000) , 2519 .
[3] Edward R. Soares , Jeffery D. Fuller , Phil J. Marozick and Robby L. Alvarez , *IEEE Transactions MTT* , **48**(2000) , 1190 .
[4] Helmut Piel , 第一届中德高温超导电子学讨论会 , 2002 年 9 月(北京).
[5] 何艾生、张太平、周岳亮、何萌、黎红、何豫生 《低温物理学报》, **21**(1999) , 420 .
[6] 何豫生、黎红、何艾生、李顺洲、李春光、闫令文、梁惊涛、朱文秀、周远 《低温物理学报》, **24**(2002) , 46 .

A COMPACT HIGH-TEMPERATURE
SUPERCONDUCTING NARROW-BAND
BANDPASS FILTER

CHEN JING^{1 2} SUN LIANG¹ LI SHUN-ZHOU^{1 3} HUANG JIAN-DONG¹
YIN ZHENG-CHAO¹ HE AI-SHENG¹ LI CHUN-GUANG¹ ZHANG XUE-QIANG¹
LI HONG¹ LUO SHENG² GU CHANG-ZHI¹
JIN AI-ZI¹ YANG HAI-FANG¹ FENG JI¹ HE YU-SHENG¹

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

²*Department of Physics , University of Science and Tecnology , Beijing 100083*

³*Institute of Acoustics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080*

(Received 15 October , 2003)

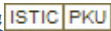
A compact high-temperature superconducting narrow-band bandpass filter was fabricated. The filter was designed to have a center frequency 1725MHz , and fabricated using double-side-coated YBCO thin film on a 0.5mm-thick lanthanum aluminate substrate ($\epsilon_r \approx 24$). An encouraging performance has been achieved. The measured responses of the filter showed a insertion loss of $< 0.3\text{dB}$, a return loss of $< -16\text{dB}$ in the filter passband , a fractional bandwidth of $< 9\%$, and a steepness better than 9dB/MHz . The deviation of the central frequency is smaller than 0.05% . A pair of transmission zeros located at both sides of the passband were introduced with a special technique in designing , which has greatly improved the frequency response characteristics of the filter and can be used as a helpful new method in future compact bandpass filter design .

Keywords : HTS , microwave applications , bandpass filter
PACC : 7470V , 7870G , 4280C

一种结构紧凑的高温超导窄带带通滤波器

作者：[陈静](#)，[孙亮](#)，[李顺洲](#)，[黄建冬](#)，[尹正朝](#)，[何艾生](#)，[李春光](#)，[张雪强](#)，[黎红](#)，[罗胜](#)，[顾长志](#)，[金爱子](#)，[杨海方](#)，[冯稷](#)，[何豫生](#)

作者单位：[陈静](#) (中国科学院物理研究所, 北京, 100080; 北京科技大学物理系, 北京, 100083)，[孙亮](#), [黄建冬](#), [尹正朝](#), [何艾生](#), [李春光](#), [张雪强](#), [黎红](#), [顾长志](#), [金爱子](#), [杨海方](#), [冯稷](#), [何豫生](#) (中国科学院物理研究所, 北京, 100080)，[李顺洲](#) (中国科学院物理研究所, 北京, 100080; 中国科学院声学研究所, 北京, 100080)，[罗胜](#) (北京科技大学物理系, 北京, 100083)

刊名：[低温物理学报](#) 

英文刊名：[CHINESE JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS](#)

年，卷(期)：2004, 26 (2)

被引用次数：4次

参考文献 (6条)

1. [Jia Sheng Hong;Michael J Lancaster;Dieter Jedamzik](#) [On The Performance of HTS Microstrip Quasi-Elliptic Function Filters for Mobile Communications Application](#)[外文期刊] 2000 (07)
2. [Genichi Tsuzuki;Masanobu Suzuki;Nobuyoshi Sakakibara](#) [Superconducting filter for IMT-2000 band](#)[外文期刊] 2000 (12)
3. [Edward R Soares;Jeffery D Fuller;Phil J Marozick;Robby L Alvarez](#) [Applications of High-Temperature-Superconducting Filters and Cryo-Electronics for Satellite Communication](#)[外文期刊] 2000 (48)
4. [Helmut Piel](#) [第一届中德高温超导电子学讨论会](#) 2002
5. [何艾生](#); [张太平](#); [周岳亮](#); [何萌](#)、[黎红](#)、[何豫生](#) [查看详情](#) 1999 (21)
6. [何豫生](#); [黎红](#); [何艾生](#) [国内首次研制成功的高温超导移动通信基站子系统原理性样机](#)[期刊论文]-[低温物理学报](#) 2002 (01)

引证文献 (4条)

1. [张爱丽](#), [李志勇](#), [徐利民](#) [超导技术在通信网络中的应用](#)[期刊论文]-[无线电通信技术](#) 2006 (4)
2. [李翡](#), [张雪强](#), [孟庆端](#), [李春光](#), [何艾生](#), [李顺洲](#), [黎红](#), [何豫生](#), [罗强](#), [顾长治](#) [适用于雷达系统的高温超导窄带滤波器](#)[期刊论文]-[低温物理学报](#) 2006 (3)
3. [张强](#), [孟庆端](#), [黄建冬](#), [孙亮](#), [李翡](#), [黎红](#), [何艾生](#), [张雪强](#), [顾长志](#), [罗强](#), [李春光](#), [何豫生](#) [适用于3G移动通信的高温超导窄带滤波器](#)[期刊论文]-[低温物理学报](#) 2006 (3)
4. [史力斌](#), [王云飞](#), [张琛](#), [张国华](#), [王东](#), [柯于洋](#), [罗胜](#), [张雪强](#), [李春光](#), [黎红](#), [何豫生](#) [高温超导薄膜共振面谐振器的微波响应研究](#)[期刊论文]-[低温物理学报](#) 2006 (4)

引用本文格式：[陈静](#), [孙亮](#), [李顺洲](#), [黄建冬](#), [尹正朝](#), [何艾生](#), [李春光](#), [张雪强](#), [黎红](#), [罗胜](#), [顾长志](#), [金](#)

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/>