



X波段高温超导滤波器研制

周春霞^①, 夏侯海^①, 左涛^{①②}, 赵新杰^①, 方兰^①, 阎少林^①

① 南开大学电子科学系, 天津 300071;

② 中电集团第16研究所, 中电集团低温电子技术研发中心, 合肥 430023

E-mail: zhouchx@mail.nankai.edu.cn

2009-04-08 收稿, 2009-07-28 接受

国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB601006)、国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA03Z213)和教育部博士点基金(编号: 200800551009)资助项目

摘要 提出了一种综合设计微带带通滤波器的方法, 除了设计微带线的结构, 还综合考虑了屏蔽盒结构对滤波器技术指标的影响. 利用该方法设计了 X 波段高温超导(HTS)微带滤波器. 使用生长于 0.5 mm 厚的 LaAlO₃ 介质上的 TI-2212 高温超导薄膜, 实现了一个 6 阶带通滤波器, 中心频率为 9500 MHz, 带宽为 500 MHz. 该滤波器具有极低的带内插入损耗——小于 0.2 dB, 以及阻带抑制高达 90 dB 以上. 在未经调谐的情况下, 测试结果与仿真结果基本一致.

关键词

低损耗
高抑制
高温超导滤波器
深空探测

基于高温超导(HTS)薄膜具有微波表面电阻小的特点, 由 HTS 薄膜制作的高温超导滤波器具有插损小、边带陡峭度高、体积小等优点. 在深空探测网络中需要极低损耗、极高抑制以及高选择性的 X 波段滤波器. 由于需要探测非常微弱的信号, 极小插入损耗、小型化的高温超导滤波器非常适用于深空探测网络中. 同时为了消除地面发射机频谱信号的干扰, 需要具有阻带高抑制性能的滤波器. 然而到目前为止, 大部分工作集中在研究用于通信基站接收机前端 S 波段及以下频段的高温超导滤波器^[1-5], 在 X 波段的卫星通讯应用方面研究较少. 一方面由于高温超导薄膜的表面电阻正比于频率的二次方, 这使得在 X 波段高温超导薄膜表面电阻小的优势不如 S 波段明显, 不利于实现极低损耗的滤波器. 另一方面, 在相同介质材料情况下设计 X 波段和 S 波段滤波器时, 由于波长不同, X 波段高温超导滤波器对微带线尺寸更敏感. 由加工误差引起微带线宽度的微小变化, 使得 X 波段滤波器频响特性偏移仿真结果要大于 S 波段滤波器, 这对加工精度提出了更高

的要求.

本文介绍了一种新型的滤波器综合设计方法, 采用尽可能低阶数的滤波器实现阻带上的高抑制, 单一滤波器在阻带上的抑制达到 90 dB 以上. 低阶数的滤波器不仅可以保证低损耗, 还能降低设计以及制作的复杂性. 同时, 我们选用临界转变温度高, 稳定性较好, 表面电阻低的高温超导薄膜, 使得该滤波器满足低损耗的要求.

1 滤波器损耗分析及滤波器设计

微带带通滤波器的损耗可以表示为^[6]

$$\Delta L'_{A0} = (4.343 \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_c}{\text{FBW} Q_{ui}} g_i) \text{ dB}, \quad (1)$$

式中 $\Delta L'_{A0}$ 表示 n 阶带通滤波器在中心频率处的插入损耗的 dB 值, Ω_c 为切比雪夫低通原形的截止频率, g_i 为切比雪夫低通原形 g 因子, FBW 为带通滤波器的相对带宽, Q_{ui} 为第 i 阶微带谐振器的无载 Q 值, 可以表示为

引用格式: 周春霞, 夏侯海, 左涛, 等. X 波段高温超导滤波器研制. 科学通报, 2009, 54: 3673~3676

Zhou C X, Xia H H, Zuo T, et al. Development of X-band high temperature superconducting filters. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0568-6

$$\frac{1}{Q_{ui}} = \frac{1}{Q_{ci}} + \frac{1}{Q_{di}} + \frac{1}{Q_{ri}}, \quad (2)$$

式中 Q_{ci} 表示由导体损耗引起的导体品质因素, Q_{di} 表示由介质损耗引起的介质品质因素, Q_{ri} 表示由辐射损耗引起的辐射品质因素.

从(1)式可以知道, 随着带通滤波器阶数的增加, 带通滤波器的损耗也随之增加. 而对于切比雪夫型带通滤波器, 阶数越大, 陡峭性越好, 带外抑制也越好. 权衡深空探测中低损耗以及高抑制两个要求, 我们选择波纹系数为 0.01 dB 的 6 阶切比雪夫型低通原型.

图 1 为计算得到的理想 6 阶切比雪夫带通滤波器的理论响应曲线. 我们可以看到该滤波器响应在阻带 8 GHz 到 8.2 GHz 的抑制大于 100 dB. 一般地, 由 HTS 微带滤波器不相邻谐振器之间的交叉耦合带来的传输零点, 使得 HTS 微带滤波器在通带边缘的陡峭性很好, 而在远离通带边缘的阻带抑制并不理想. 一般发卡型的 500 MHz 带宽的 6 阶切比雪夫型 HTS 带通滤波器的带外抑制还不到 60 dB [7].

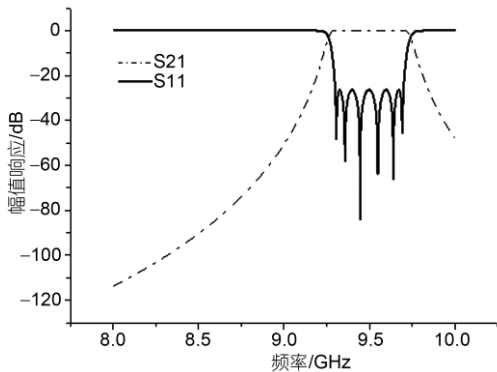


图 1 滤波器理论响应曲线

为了获得阻带高抑制的滤波器, 本文提出了一种综合设计微带带通滤波器的方法, 除了设计微带线的结构, 还综合考虑了屏蔽盒结构对滤波器技术指标的影响. 对于具有相同谐振器结构的微带带通滤波器, 狭长形的盒子设计有利于提高滤波器的带外抑制. 由全波仿真软件计算得到盒子宽度与 HTS 滤波器在阻带上 S21 响应值的关系如图 2 所示, 从图中可以看到, 滤波器盒子宽度由 24 mm 减小到 6 mm 时, 滤波器阻带抑制由 40 dB 增加到 100 dB. 如果盒子的宽度继续减小, 滤波器阻带抑制将继续增加.

然而盒子宽度不能选择过窄, 因为微带线离盒子侧壁越近, 盒子损耗就会越大. 因此, 根据前面分析, 我们选择盒子的宽度为 6 mm, 此时阻带抑制大于 100 dB.

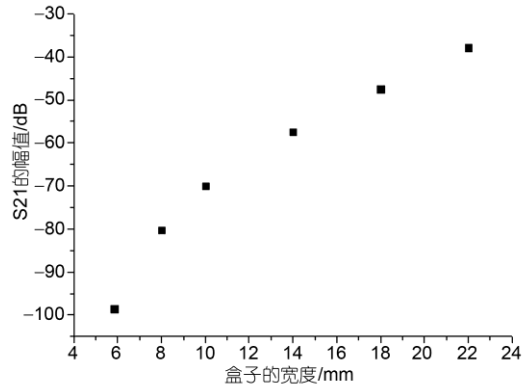


图 2 不同盒子宽度的 HTS 滤波器阻带上 S21 响应值

由波纹系数为 0.01 dB 的 6 阶切比雪夫型低通原型, 可以计算耦合系数矩阵为 [8]

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.970 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.970 & 0 & 0.660 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.660 & 0 & 0.621 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.621 & 0 & 0.660 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.660 & 0 & 0.970 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.970 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

以及端口耦合系数

$$R1 = R2 = 1.280. \quad (4)$$

根据(3)和(4)式, 我们在 0.5 mm 厚的 $LaAlO_3$ 介质上设计了中心频率为 9500 MHz, 带宽为 500 MHz 的高温超导滤波器, 该 6 阶 HTS 滤波器的版图如图 3 所示. 该滤波器结构的仿真结果如图 4 和图 5 实线所示, 其中图 4 实线为该滤波器结构在软件 Sonnet's em 下仿真得到的传输特性 S21, 图 5 中实线为反射特性 S11. 从图中可以看到, 该滤波器的中心频率为 9500 MHz, 带宽为 500 MHz, 阻带抑制大于 100 dB.



图 3 滤波器版图结构

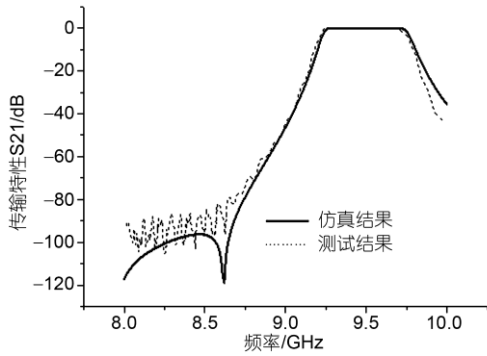


图4 HTS滤波器的仿真及测试 S21 响应曲线

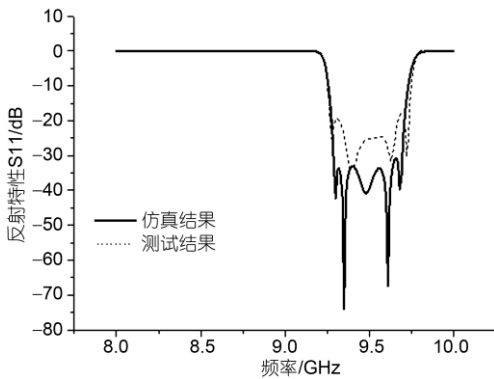


图5 HTS滤波器的仿真及测试 S11 响应曲线

2 高温超导薄膜及滤波器制作

本文研制的滤波器采用的是 $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ (Tl-2212)高温超导薄膜, 衬底材料采用厚度为 0.5 mm 的 2 英寸(1 英寸=2.54 cm)LaAlO₃(001)基片. Tl-2212 超导薄膜是采用 2 步法制作的, 首先用磁控离子溅射的方法在 LaAlO₃(001)基片上淀积上双面 Tl-Ba-Ca-Cu-O 非晶先驱薄膜, 然后通过严格的高温热处理使非晶先驱薄膜转变为 Tl-2212 超导薄膜. Tl-2212 超导薄膜的临界转变温度为 105 K 左右, 在 10 GHz, 77 K 下的表面电阻低于 0.5 mΩ^[9]. 使用这种 HTS 超导薄膜制作的微带谐振器在 10 GHz 频率下的无载 Q 值大于 10⁵^[10]. 超导滤波器芯片是采用常规半导体光刻工艺和离子束刻蚀工艺完成的. 为了方便超导薄膜微带线与 SMA 微波接头的连接, 在超导滤波器的输入和输出端口分别蒸镀了金膜.

3 滤波器测试结果与讨论

本实验使用 Agilent 矢量网络分析仪对滤波器进行了测试, 同时用制冷机将滤波器冷却到 77 K 温度.

测试的滤波器传输特性曲线(S21)如图 4 所示, 实线是仿真设计的曲线, 虚线是实际测试结果. 可见滤波器实际测试结果与仿真设计的曲线吻合得比较好, 在未经调谐的情况下, 测试结果显示中心频率和带宽与设计基本一致, 阻带抑制好于 90 dB. 图 6 为传输特性 S21 在通带内的放大曲线图, 由图可以看出在通带内的插入损耗好于 0.2 dB. 在对网络分析仪进行校准时, 我们选择与高温超导滤波器相连的刚性同轴连接器作为校准端口, 因此测得的插入损耗只包括滤波器本身损耗及其两个 SMA 接头损耗. 图 5 给出了滤波器的仿真及测试的回波损耗(S11)响应曲线. 实线是仿真设计的曲线, 虚线是实际测试结果. 实测带内回波损耗好于 18 dB, 略大于仿真结果. 这是由于在实际加工过程中, 由于焊接原因造成 SMA 接头与滤波器 50 Ω 馈线处不完全匹配以及微带线光刻的误差造成的.

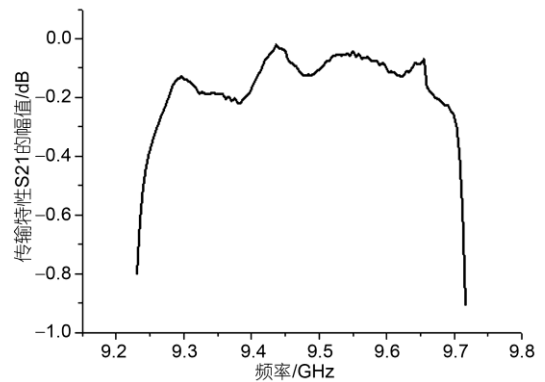


图6 S21 通带内的放大曲线图

4 结论

本文讨论了 X 波段高温超导滤波器的高性能指标, 通过理论分析及电磁仿真设计, 总结出一种新颖的微带带通滤波器的综合设计方法, 结合深空探测网络中极低损耗、阻带高抑制性能的技术要求, 我们选用生长在 LaAlO₃衬底上 Tl-2212 高温超导薄膜, 通过相关的综合设计, 实现了一个可用于深空探测网络中的具有极低插入损耗, 阻带高抑制性能的 HTS 带通滤波器. 在未经调谐的情况下, 滤波器的带内插入损耗好于 0.2 dB, 阻带抑制好于 90 dB. 此滤波器满足深空探测网络中的技术要求.

参考文献

- 1 Zuo T, Fang L, Wu Z, et al. A self-equalized HTS filter for future mobile. *Physica C*, 2007, 459: 1—4[[doi](#)]
- 2 Ning J S, Yang K, Luo Z X, et al. Design of high temperature superconducting contiguous-band diplexer. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54: 1279—1281[[doi](#)]
- 3 Xia H H, Zhou C X, Zuo T, et al. Development of high temperature superconducting filters operating at temperatures above 90 K. *Chinese Sci Bull*, doi: 10.1007/s11434-009-0347-4
- 4 Hong J, Lancaster M J, Jedamzik D, et al. On the development of superconducting microstrip filters for mobilecommunications applications. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1999, 47: 1656—1663[[doi](#)]
- 5 Zhang X, Meng Q, Li F, et al. A 24-pole high T_c superconducting filter for mobile communication applications. *Supercond Sci Technol*, 2006, 19: 394—397[[doi](#)]
- 6 Hong J S, Lancaster M J. 2001 Microstrip Filters for RF/Microwave Application. New York: Wiley, 2001
- 7 刘娟秀, 羊恺, 罗正祥,等. 星载高温超导滤波器研制. *通信学报*, 2006, 27: 105—109
- 8 Richard J C. General coupling matrix synthesis methods. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1999, 47: 433—442 [[doi](#)]
- 9 Yan S, Fang L, He M, et al. $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ thin films on 2in. $LaAlO_3(001)$ substrates. *Cryogenics*, 2005, 45 : 41—44[[doi](#)]
- 10 Zhang X, Yan S, Ji L, et al. Microwave surface resistance measurement of hts films using dielectric resonators. *Physica C*, 2006, 449: 96—99[[doi](#)]