

# 高温超导膜微波表面电阻 $R_s$ 对微波滤波器 插入损耗的贡献 \*

李宏成<sup>1)2)†</sup> 王瑞兰<sup>1)</sup> 魏斌<sup>2)</sup> 郑东宁<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院物理研究所超导国家实验室, 北京 100080)

<sup>2)</sup>(清华大学物理系, 北京 100084)

(2004年4月21日收到; 2004年5月24日收到修改稿)

利用微波电路仿真软件, 分析高温超导膜微波表面电阻  $R_s$  对各种频率、各种级数的滤波器插入损耗的影响。结果给出: 对于级数较少、频率较低的滤波器, 使用  $R_s$  较高的薄膜或厚膜就可以得到很低的插入损耗; 对于频率较高(高于 6GHz), 或极数较多(超过 8 极)的滤波器, 就必须采用高质量的高温超导薄膜( $R_s < 1\text{m}\Omega$ )。

**关键词:** 高温超导膜, 微波滤波器, 微波表面电阻, 插入损耗

**PACC:** 7360K, 7475

## 1. 引 言

微波滤波器是微波系统中的重要元件。微波滤波器的性能对微波系统整体性能有重要的影响, 因而, 新型的性能优越的滤波器的研究受到广泛的关注。微波滤波器的性能, 特别是插入损耗, 直接与制作器件所用材料的微波表面电阻  $R_s$  有关。通常, 微波滤波器是用波导谐振器或介质谐振器构成的。这些滤波器的插入损耗相当低( $\leq 1\text{dB}$ ), 但是, 体积很大。特别是, 在要求滤波器的通带边缘很陡峭因而级数很多时, 体积就会大得不可接受, 从而限制了滤波器性能的提高。为了减小体积, 30 多年前, 就已出现了平面微带结构的滤波器。微带线用薄的铜箔制作, 大大减小了体积, 但是却大大提高了插入损耗。特别是级数增加时, 插入损耗的增加就更严重, 这就限制了级数的提高。所以用常规导体制作的器件, 体积减小和性能提高是两个矛盾的因素, 必须作适当折中。因此, 微带线技术并未得到非常广泛的应用。高温超导体(HTS)的发现特别是高温超导体的  $R_s$  非常小的特点大大缓解了这个矛盾, 为微波器件的小型化和性能的提高带来了巨大的机会。

HTS 的微波表面电阻  $R_s$  比普通金属(如铜)低很多。在 10GHz, 高质量  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) 外延薄膜 77K 温度下的  $R_s$ ( $0.2\text{m}\Omega$ ) 是常温下铜的  $R_s$ ( $26.1\text{m}\Omega$ )<sup>[1]</sup> 的 1/100 以下。HTS 的  $R_s$  正比于频率的平方, 正常金属的  $R_s$  正比于频率的 1/2 次方, 因此, 二者的比值正比于频率的 3/2 次方( $(f/10\text{GHz})^{3/2}$ )。频率低于 10GHz 时, HTS 的  $R_s$  与铜相比小得更多。由于 HTS 的  $R_s$  很小, 可以用它来制作低插入损耗、小体积、高性能的滤波器、延迟线等重要的微波无源器件。

HTS 另一种形式是厚膜, 制作工艺比较简单, 可以制成非平面形状, 而且对面积的限制也较小, 与薄膜相比具有较大的灵活性。HTS 厚膜的  $R_s$  虽然比外延薄膜高数倍, 但是仍然比铜小很多。在 77K 和 10GHz 时, YBCO 厚膜的  $R_s$  可以达到  $2\text{ m}\Omega$ <sup>[2,3]</sup>,  $\text{Ta}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{O}_y$  (TBCCO) 厚膜可以达到  $1.3\text{ m}\Omega$ <sup>[4,5]</sup>。已经用 HTS 厚膜制作了多种微波器件, 如谐振腔、天线、射频耦合线圈等等<sup>[2,3]</sup>。一家公司(Illinois Superconductor Corporation)用 YBCO 厚膜制备了移动通信基站用的滤波器, 包括 10 级准椭圆函数带通滤波器(中心频率 842MHz)和 6 级准椭圆函数陷波滤波器<sup>[3]</sup>, 具有很陡峭的边缘和很低的插入损耗。

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: G1999064604), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA306143)和国家自然科学基金(批准号: 10221002, 10174093)资助的课题。

†E-mail: lihc@tsinghua.edu.cn

两种不同形式的高温超导体具有不同的微波表面电阻  $R_s$ , 都可用来制备微波滤波器. 在研制 HTS 微波滤波器时应该选者哪一种, 是薄膜还是厚膜? 换句话说, 微波器件对 HTS 的  $R_s$  要求究竟是多少? 这个问题是器件研制和材料研制工作都关心的问题. 本文对不同级数、中心频率不同的滤波器, 分析其插入损耗 IL 与制作此器件的 HTS 的  $R_s$  的关系, 给出一些定量的关系, 从而回答此问题.

## 2. 分析方法

我们采用 Ansoft 公司的 Serenade 微波电路仿真软件设计微波滤波器; 选择切比雪夫 (Chebyshev) 响应滤波器作为分析对象. 滤波器为发卡形 (hairpin type) 微带结构, 衬底厚度为 0.5mm, 介电常数取为 10, 微波盒的高度为 5mm. 为了进行比较, 各个滤波器相对通带宽度均为 5%. 在无损耗 ( $R_s = 0$ ,  $\tan\delta = 0$ ) 情况下, 优化滤波器几何参数, 使插入损耗 IL 尽可能小 (记为  $IL_0$ ). 在所采用的仿真软件中, 用电阻率  $\rho$  计入导体损耗的影响. 为此, 引入超导体的微波等效电阻率  $\rho_{eff}$ , 可以由下列各式求出它. 理论和实验都说明, 超导体的微波表面电阻 (记为  $R_s^*(f)$ ) 与频率的二次方成正比:

$$R_s^*(f) = R_{s0}(f/f_0)^2, \quad (1)$$

其中  $R_{s0}$  是某一参考频率 ( $f_0$ ) 和特定温度下的超导体的微波表面电阻. 通常取  $f_0 = 10\text{GHz}$ , 温度为 77K. 正常金属的  $R_s^*(f)$  与频率和电阻率的二分之一次方成正比:

$$R_s^*(f) = R_{s00}(f_0/\rho_0)^{1/2}, \quad (2)$$

其中  $R_{s00}$  与  $\rho_0$  是频率为  $f_0 = 10\text{GHz}$  时正常金属的微波表面电阻与电阻率. 我们假定超导体与某一种正常金属的微波表面电阻相同, 即令  $R_s^*(f) = R_s^*(f)$ , 就可得到超导体的等效电阻率

$$\rho_{eff} = \rho_0(R_{s0}/R_{s00})^2(f/f_0)^3, \quad (3)$$

取铜在常温下的  $R_{s00}$  与  $\rho_0$  作为参考数据<sup>[1]</sup>:  $R_{s00} = 26.1\text{m}\Omega$ ,  $\rho_0 = 1.773\mu\Omega\text{cm}$ ,  $f_0 = 10\text{GHz}$ . 因此, 只要给定超导体的  $R_{s0}$ , 就可以由 (3) 式求出各种频率下的等效电阻率  $\rho_{eff}$ , 由此可以计算出考虑到导体的损耗后滤波器的插入损耗 (记为  $IL_e$ ). 从而超导体对插入损耗的贡献  $IL_{se}$  为

$$IL_{se} = IL_e - IL_0, \quad (4)$$

我们可以改变  $R_{s0}$ , 对一特定的滤波器计算出导体

所带来的插入损耗  $IL_{se}$  从而讨论  $R_{s0}$  对工作在不同频率和不同结构的滤波器的影响.

## 3. 结果与分析

我们分析了  $R_{s0}$  对 4, 6, 8 级 Chebyshev 响应、工作频率 1, 2, 4, 6, 10GHz 的滤波器导体插入损耗的影响. 作为一个典型例子, 这里给出 6 级 Chebyshev 发卡形 1GHz 带通滤波器优化后的几何尺寸: 介电常数为 10, 谐振器线宽 = 0.1712mm, 发卡两个脚的长度为 28.2905mm, 两脚间距离为 2.2981mm, 发卡间距分别为 1.2331, 1.5112, 1.5555, 1.4975, 1.2007mm, 输入馈线与第一个发卡的距离为 0.4104mm, 输出馈线与第六个发卡的距离为 0.39456mm, 输入馈线与输出馈线的宽度分别为 0.1719, 0.1786mm. 图 1 给出了此滤波器在理想情况下 ( $R_{s0} = 0$ ,  $\tan\delta = 0$ ) 的传输特性曲线, 图 2 为其细节. 由图 1 和图 2 可见, 此滤波器反射损耗 ( $S_{11}$ ) 低于  $-25\text{dB}$ , 最大插入损耗为  $-0.016\text{dB}$ , 说明此滤波器的几何尺寸优化程度已足够好了. 图 3 为导体微波表面电阻  $R_{s0}$  取不同的数值时, 其传输特性  $S_{21}$  的变化情况. 图 3 说明导体微波表面电阻增加时插入损耗同步增加. 由图 3 各条曲线, 取通带内  $S_{21}$  的最小点, 作为  $IL_e$ , 即可得此滤波器的  $IL_{se}-R_{s0}$  线. 对频率为 2, 4, 6, 10GHz 的其他滤波器做同样的分析, 可得到各种频率滤波器的  $IL_{se}-R_{s0}$  线, 如图 4 所示. 同样可以计算 4 级、8 级各种频率的滤波器的  $S_{21}-f$  曲线族, 以及  $IL_{se}-R_{s0}$  线族, 如图 5 和图 6 所示.

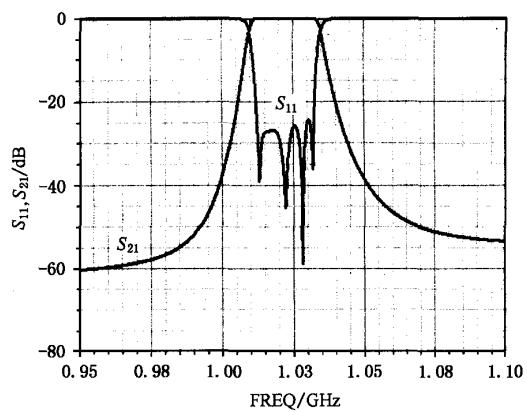


图 1 1GHz 6 级 Chebyshev 发卡形带通滤波器传输特性  $S_{11}$  与  $S_{21}$  曲线

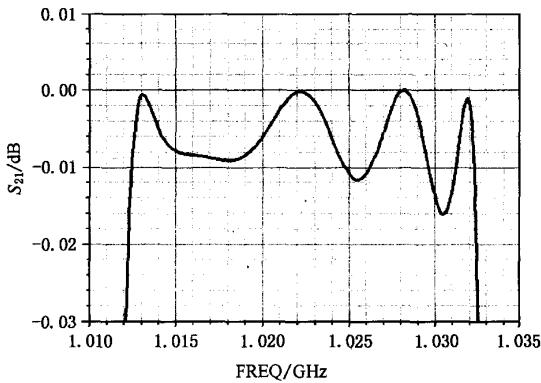


图2 1GHz 6级 Chebyshev 发卡形带通滤波器传输特性曲线  $S_{21}$  的细节

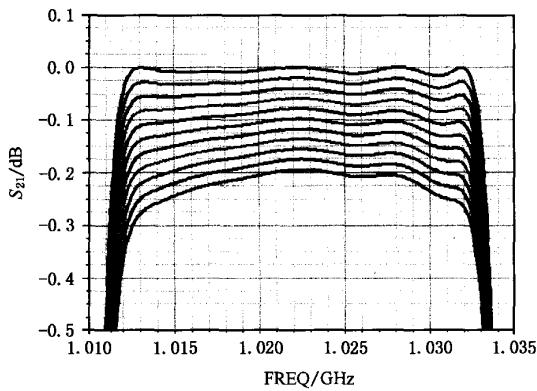


图3 微波表面电阻  $R_s0$  对滤波器(6级 Chebyshev 带通滤波器, 中心频率 1GHz)传输特性  $S_{21}$  的影响(自上到下,  $R_s0$  分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 mΩ)

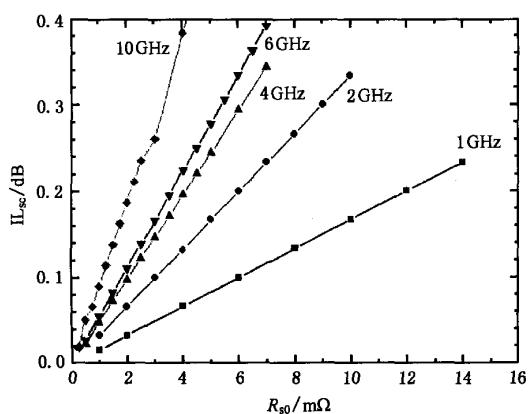


图4 各种频率下,4级 Chebyshev 带通滤波器导体插入损耗  $IL_{sc}$  与  $R_s0$  的关系

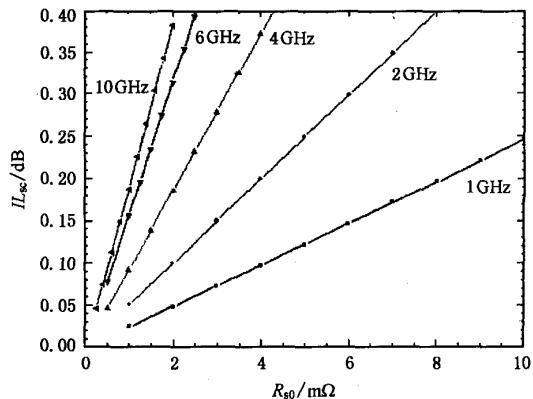


图5 各种频率下,6级 Chebyshev 带通滤波器导体插入损耗  $IL_{sc}$  与  $R_s0$  的关系

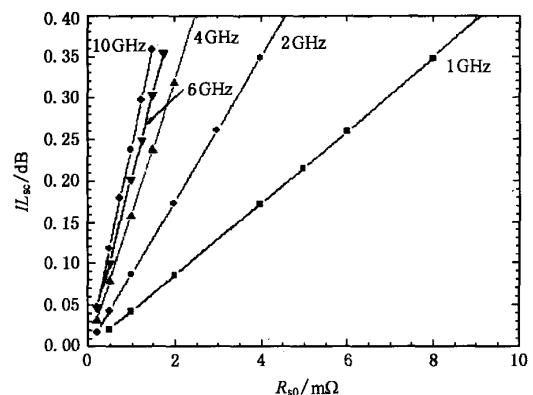


图6 各种频率下,8级 Chebyshev 带通滤波器导体插入损耗  $IL_{sc}$  与  $R_s0$  的关系

图4,5,6 所给出的 4,6,8 级带通滤波器在各种频率下导体插入损耗  $IL_{sc}$  与  $R_s0$  的关系曲线都是很好的直线,说明导体插入损耗与构成此滤波器导体的微波表面电阻  $R_s0$  成正比。比较三个图中各条曲线的斜率可知:滤波器级数越多、中心频率越高,曲线的斜率越大、插入损耗越高。这些特点可清楚地反映在表1中。表1给出了滤波器的级数、中心频率不同时,要求导体插入损耗( $IL_{sc}$ )分别为 0.1dB, 0.2dB 时,对超导膜微波表面电阻  $R_s0$  的要求。在低频下,如 1GHz, 对超导体微波表面电阻  $R_s0$  要求较低,用高温超导厚膜就可以使滤波器最大插入损耗低于 0.2dB。当滤波器的级数很多,或中心频率较高时,必须采用高质量的高温超导薄膜,才能使滤波器最大插入损耗低于 0.2dB。

表 1 各种 HTS 微波滤波器对超导膜  $R_{s0}$  的要求

$R_{s0}/\text{m}\Omega$	频率/GHz	1	2	4	6	10
级数( $IL_{sc}$ )						
4(0.2dB)		12.0	6.0	4.0	3.6	2.1
4(0.1dB)		6.0	3.0	2.0	1.8	1.1
6(0.2dB)		8.2	4.0	2.2	1.3	1.1
6(0.1dB)		4.1	2.0	1.1	0.64	0.54
8(0.2dB)		4.6	2.4	1.3	1.0	0.84
8(0.1dB)		2.3	1.2	0.6	0.5	0.42

## 4. 结 论

我们计算了各种频率(1—10GHz)、各种级数(4,

6,8 级)Chebyshev 带通滤波器插入损耗  $IL_{sc}$  与超导体的微波表面电阻  $R_{s0}$  的关系。分析结果给出,  $IL_{sc}$  与  $R_{s0}$  呈线性关系; 其斜率与频率和滤波器的级数有关; 滤波器中心频率越高对超导体的  $R_{s0}$  要求越严格; 同样滤波器结构越复杂(级数多), 对  $R_{s0}$  要求越严格。在中心频率不高(低于 2GHz)或滤波器级数不太高(6 级以下)的情况下, 可以采用高温超导厚膜或一般质量的薄膜。在中心频率较高(高于 4GHz)或滤波器级数较高(高于 8 级)时, 必须采用高质量的外延薄膜。

- [1] Lancaster M J 1996 *Passive Microwave Device Application of High Temperature Superconductors* (London: Cambridge University Press)
- [2] Button T W, Smith P A, Dolman G, Meggs C, Remillard S K, Hodge J D, Penn S J and Alford N M 1966 *IEEE Tran. Micro. Theo. Tech.*, MTT-14 1356
- [3] Alford N M, Penn S J and Button T W 1997 *Supercond. Sci. Technol.*, 10 169
- [4] Su L Y, Grovenor C R M, Gorringe M J, Dewhurst C D, Cardwell D A, Jenkins R and Jones H 1994 *Physica* C229 70
- [5] Jenkins A P, Su L Y, Kale K S, Gorringe M J, Burgoyne J W, Dew-Hughes D and Grovenor C R M 1995 *IEEE Tran. Appl. Supercon.* 5 1095

# Contributions of the surface resistance of high-temperature superconducting films to the insertion loss of the microwave filters\*

Li Hong-Cheng<sup>1)2)</sup> Wang Rui-Lan<sup>1)</sup> Wei Bin<sup>2)</sup> Zheng Dong-Ning<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (National Laboratory for the Superconductivity, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>2)</sup> (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 21 April 2004; revised manuscript received 24 May 2004)

## Abstract

In this paper it is shown that the influence of the surface resistance of the high-temperature superconductors (HTS) on the insertion losses of the microwave filters with various poles and central frequencies was analyzed using simulation software for the electrical circuits. It is shown that HTS thick films or HTS thin films with relatively high surface resistance can be used to construct low insertion loss microwave filter with a few poles or with low central frequency. But high-quality epitaxial thin films must be used to construct low loss microwave filter with many poles (more than 8 – poles) or with high central frequency (higher than 6GHz).

**Keywords:** high temperature superconducting films, microwave filters, microwave surface resistance, insertion losses

**PACC:** 7360K, 7475

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999064604), the National High Technology Development Program of China(Grant No.2002AA306143), and the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos.10221002, 10174093).

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、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/>