易加工开口环高温超导线性相位滤波器

张天良[1]，羊　恺[2]，补世荣[2]，刘娟秀[2]，罗正祥[1]

(1. 电子科技大学光电信息学院　成都　610054;　2. 电子科技大学电子工程学院　成都　610054)

【摘要】基于常规正方形结构开口环谐振器制作线性相位滤波器时，耦合缝太窄而不适合常规光刻工艺的加工，研究了高温超导开口环谐振器间的混合耦合，提出了适合常规光刻工艺加工的改进结构，并利用这种结构研究了一中心频率在1 750 MHz，带宽为80 MHz的高温超导六级线性相位滤波器。

关　键　词　开口环;　谐振器;　耦合;　超导;　线性相位;　滤波器

中图分类号　TN751.1+2;　O511+.9　　文献标识码　A

Design of Open-Loop Resonator HTSC Linear-Phase Filter

Zhang Tianliang[1]，Yang Kai[2]，Bu Shirong[2]，Liu Juanxiu[2]，Luo Zhengxiang[1]

(1. School of Opto-Electronic Information, UEST of China　Chengdu　610054;

2. School of Electronic Engineering, UEST of China　Chengdu　610054)

Abstract　The coupling gap between traditional open-loop microstrip resonators of high temperature superconductivity filter is too narrow to be fabricated with normal photolithography technology. This paper studies the mixed coupling of high temperature superconductivity open-loop microstrip resonators and presents a new improved resonator structure which can be fabricated with normal photolithography technology. A six-pole high temperature superconductivity linear phase filter is designed with this new structure and simulated results are also presented here.

Key words　open-loop;　resonator;　coupling;　superconductivity;　linear-phase;　filter

利用高温超导薄膜制作的滤波器具有极低的插损(＜0.2 dB)和陡峭的带外截止特性(＞30～40 dB/MHz)。为减小器件尺寸，在利用高温超导微带电路进行微波器件设计时，常采用具有较高介电常数以及较薄的基片。开口环谐振器是一种常见的半波长谐振器，传统采用的结构为近似正方形结构且开口位于单边的中部。但利用这种结构实现高温超导线性相位滤波器的制作时，谐振器间的耦合缝太窄而不利于常规光刻工艺的加工,常规光刻工艺要求线宽和缝宽都大于0.2 mm，即便采用特殊工艺加工，其成品率也太低。为此对高温超导开口环谐振器间的混合耦合作进一步分析以寻求适合常规光刻工艺加工的结构。

1　开口环谐振器间混合耦合分析

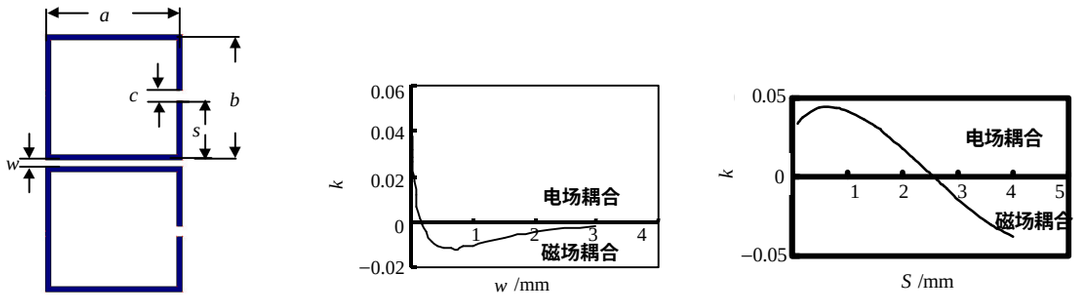
当两个具有相同谐振频率的谐振器之间发生耦合时，其谐振频率会发生变化[1]。假设其分离出的高、低频率分别为 f_1， f_2，则其耦合系数 $k_{1,2}$ 可由下式求得[1,2]：

收稿日期：2004－04－20
基金项目：四川省青年基金资助项目
作者简介：张天良(1976－)，男，在职硕士生，主要从事高温超导微波应用方面的研究.

$$k_{1,2} = (f_2^2 - f_1^2)/(f_2^2 + f_1^2) \tag{1}$$

1.1 发生混合耦合时耦合缝宽与耦合系数间的分析

在介电常数为23.5，厚度为0.5 mm的$LaAlO_3$基片上采用图1a结构的高温超导谐振器进行混合耦合(线宽0.25 mm，边长a、b均为6.14 mm，开口c为0.93 mm，中心频率为1 750 MHz)，利用全波分析并结合式(1)得到耦合缝w从0.002 mm变到3 mm时耦合系数$k_{k,k+1}$的变化情况[3]，见图1b。



(a) 结构示意 (b) 耦合系数与耦合缝宽间的关系 (c) 时耦合系数与开口位置的关系

图1 正方形结构谐振器间的混合耦合

从图1b可以看出，当需要获取较大的耦合系数时，耦合缝隙较小(如耦合系数为0.029 7时，耦合缝宽为0.035 mm)。而且介电常数增大和基片厚度减小，耦合缝隙都将会变得更小，这势必出现缝宽w小于工艺所要求的线缝最低宽度的情况，因此需要对这种结构进行适当的变形并作进一步的分析。

1.2 固定耦合缝宽改变开口位置的混合耦合分析

为了满足工艺要求，可首先保证耦合缝宽，通过改变开口位置来改变耦合部位的电流分布来改变耦合系数[3]。模拟分析并得到固定较大缝宽为0.2 mm时，开口离耦合缝的距离s从0.2 mm变到4 mm时耦合系数$k_{k,k+1}$的变化情况，见图1c。

1.3 大耦合系数的获取

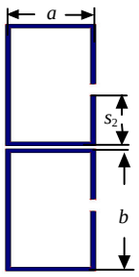


图2 长方形结构开口环谐振器

从图1c可以看出，采用图1a的结构形式并上下移动开口，最高只能获取0.042的耦合系数，为了获取更高的耦合系数除了改变开口位置外还必须改变开口环本身的形状。可以采用图2所示改进的开口环谐振器结构，主要是使谐振器间的耦合尽可能处于电场耦合或者磁场耦合单一模式，这样可以减小电场耦合与磁场耦合相互抵消的影响，以便在同等耦合缝宽时获取较大的耦合系数。在图2中，同样在谐振频率为1 750 MHz时(a为4.4 mm, b为7.93 mm)，保证较大耦合缝宽为0.2 mm，对开口离耦合缝的距离s_2从0.2 mm变到6.8 mm时耦合系数$k_{k,k+1}$的变化情况进行模拟仿真。

仿真范围内，最大耦合系数为0.072，与图1相比，在耦合缝隙同为0.2 mm时，最大耦合系数得到了明显的提高。

2 高温超导六级线性相位滤波器的实现

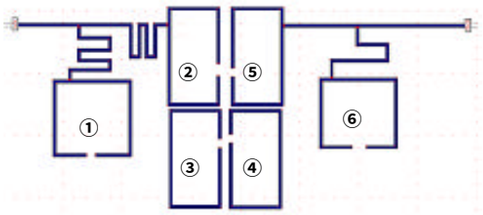


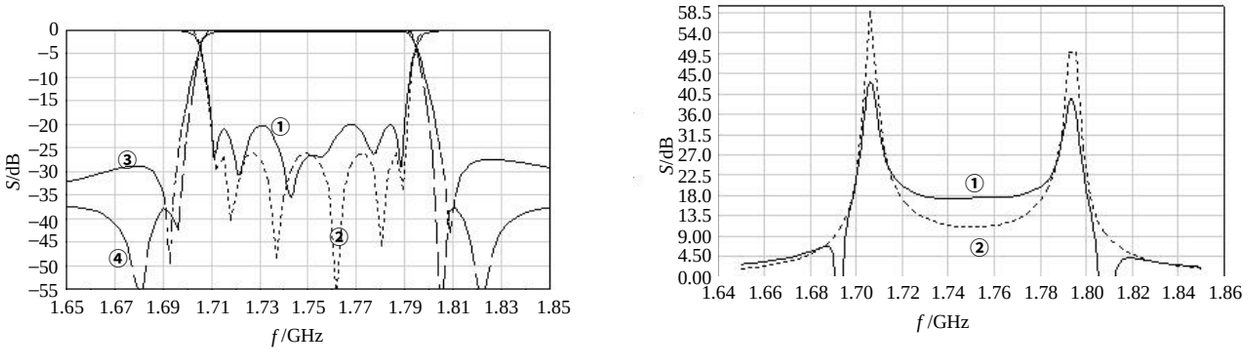
图3 线性相位滤波器平面示意图

2.1 耦合系数的确定

本文以图3所示结构研究了一线性相位滤波器，其中心频率为1 750 MHz，带宽为80 MHz(即相对带宽为0.045 71)，带内反射＞20 dB，实频率传输零点在$p = \pm j1.414$[4]。图3已标出各级谐振器的编号顺序，通过综合可以得到各级谐振器间的耦合系数如下：$M_{23} = M_{45} = 0.031\ 059\ 541$，$M_{25} = 0.008\ 676\ 127$，$M_{34} = 0.021\ 044\ 709$表中$M_{i,j}$代表第$i$级和第$j$级间的耦合系数。

2.2　六级线性相位滤波器的仿真设计

如果中间四级采用图1a所示结构，当耦合系数$M_{23} = M_{25} = 0.031\ 06$时，从图1b获得耦合缝宽为0.03 mm，太小，不适合常规光刻工艺加工。结合前面混合耦合分析结论，同时为减小滤波器的横向尺寸，本文最终采用了图3所示的结构来设计滤波器。结构中，第2、3级间和第4、5级间的耦合缝宽为0.2 mm，通过微调谐振器开口的位置以及第2、5级间和第3、4级间的耦合缝宽进行线性相位滤波器的设计，利用全波分析软件模拟得到如图4所示的幅频特性和群时延特性。为了实现线性相位，本文设计的滤波器是由传统四级准椭圆函数滤波器通过“拔级”技术而得[4]，特将传统四级准椭圆函数滤波器响应也置于图4中。从图4b可以看出所设计的线性相位滤波器的群时延特性在通带范围内得到很大的改善。



(a) 幅频响应

① 线性相位滤波器S_{11}　② 传统四级准椭圆函数滤波器S_{11}

③ 线性相位滤波器S_{21}　④ 传统四级准椭圆函数滤波器S_{21}

(b) 群时延响应

① 线性相位滤波器　②传统四级准椭圆函数滤波器

图4　中间四级为长方形结构的六级线性相位滤波器与传统四级准椭圆函数滤波器响应比较

3　结 论

在满足常规光刻加工工艺所要求的耦合缝宽的条件下，可以通过改变开口环谐振器开口的位置以及谐振器本身的形状来获取特定的耦合系数。并为利用高温超导开口环谐振器进行具有混合耦合结构的滤波器的设计提供了设计保障。

本文研究工作得到电子科技大学青年基金(NO.YF020206)的资助，在此表示感谢。

参 考 文 献

[1] Hong J S, Lancaster M J. Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters[J]. IEEE Trans-MTT, 1996, 44(9): 2 099-2 109

[2] Thodes J D. General extracted pole synthesis technique with applications to low-loss TE_{011} mode filters[J]. IEEE-MTT, 1980, 28(9): 1 018-1 028

[3] 羊　恺, 补世荣, 张其劭, 等. 高温超导小型化多曲折线滤波器研制[J]. 科学通报, 2002, 49(18): 1 378-1 380

[4] Kenneth S K, Lancaster M J. The design of microstrip six-pole quasi-elliptic filter with linear phase response using extracted-pole technique[J]. IEEE-MTT, 2001, 49(2): 321-327

编　辑　徐安玉