



# 高温超导连续通带双工器的研制

宁俊松, 羊恺, 罗正祥, 补世荣, 张天良

电子科技大学光电信息学院, 成都 610054;

电子科技大学空天科学技术研究院, 成都 610054

E-mail: wbxz@uestc.edu.cn

2008-08-29 收稿, 2008-12-11 接受

电子科技大学青年基金资助项目(编号: L08047401)

**摘要** 在以  $\text{LaAlO}_3$  为衬底的钇系高温超导薄膜 YBCO 基片上, 采用并联两个单终端低通原型带通滤波器构成部分互补的滤波器的方式, 设计并制作一个四极高温超导连续通带双工器, 通带工作频率分别为  $3\sim 3.5\text{ GHz}$  和  $3.5\sim 4\text{ GHz}$ . 与常规金属材料制作的双工器相比, 体积减少四分之三, 插入损耗减少 2 dB. 在液氮温区 77 K 时, 高温超导双工器的测试结果为: 通带内插入损耗小于 0.8 dB, 通带间带外抑制大于 30 dB@通带中心频率. 为进一步研制高温超导多工器提供了很好的借鉴, 对将来高温超导信道化接收机系统的研究和设计具有重要的意义.

**关键词**  
高温超导  
连续通带双工器  
多工器  
信道化接收机

多工器(又称分波器)是信道化接收机的关键器件, 作用是将多个滤波器以并联或串联形式组合起来, 把一个宽的频段分成多个窄的频段, 因此信道化接收机就像多个不同频段接收机的集合体, 具有覆盖频率广的特点. 高温超导滤波器具有体积小、插入损耗低以及滤波特性陡峭的优点, 在可接受损耗下高温超导滤波器能实现更窄的带宽, 与常规滤波器相比具有更小的体积. 利用上述优势可以设计出容纳更多信道的低损耗高温超导多工器, 从而构建高温超导信道化接收机的前端系统, 其系统框图见图 1.

同时由于系统中低噪声放大器工作在液氮温区, 放大器减少了热噪声, 在 X 波段带宽 200 MHz 下噪声可以降低到 0.2 dB 以下. 因此以高温超导多工器为核心器件所构建的信道化接收机与常规信道化接收机相比, 具有体积小、容纳信道多、更低的系统噪声、更高的灵敏度和频率分辨率等多项优势, 在电子侦察系统(ESM)和卫星通信系统中有着广泛的应用前景.

近年来国际上对高温超导多工器以及高温超导信道化接收机的研究和应用十分重视, 如一个由

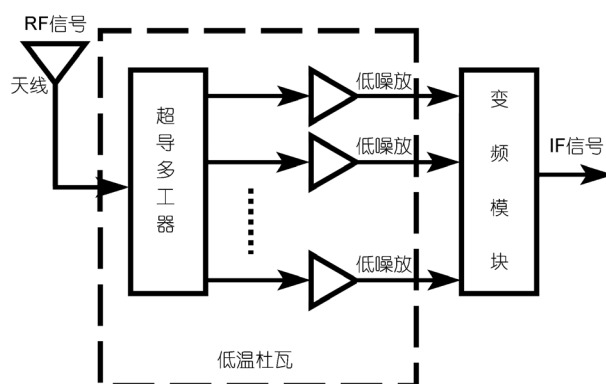


图1 高温超导信道化接收机系统框图

NASA(美国宇航局)领导的组织, 包括 Lockheed-Martin, COM DEV Ltd.等知名公司, 正在推动发展此项高温超导技术在未来美国宇航计划中应用. 文献[1,2]介绍了应用在 INTELAT(国际商业卫星公司)商业卫星计划的 C 波段 60 个通道的高温超导多工器, 重量和体积比常规介质多工器小 50%, 能够数十倍降低宇航发射成本. 文献[3]报道国外正在开发研制采用高温超导技术的信道化接收机, 频率覆盖 2~18 GHz, 共 160 个通道.

**引用格式:** 宁俊松, 羊恺, 罗正祥, 等. 高温超导连续通带双工器的研制. 科学通报, 2009, 54(6): 834~837

Ning J S, Yang K, Luo Z X, et al. Design of high temperature superconducting contiguous-band diplexer. Chinese Sci Bull, 2009, 54(7): 1279—1281, doi: 10.1007/s11434-009-0055-0

## 1 高温超导连续通带双工器设计

多工器根据其信道路数分别称为双工器、三工器、四工器等等。双工器是多工器的最简单形式,也是构成多工器的基本单元,是多工器的研究和设计的基础,因此本文将着重讨论。信号频谱是由几个相连的频段所组成的多工器,称为连续通带多工器。连续通带多工器可以实现频谱利用率最大化,但是由于相邻滤波器通带相互交迭,而单个滤波器在通带频带以外是严重失配的,使得滤波器之间相互作用更加明显,将造成多工器通带间性能变坏,甚至无法工作,因而其设计难度更大,必须采用特殊方法来消除不希望的相互作用。

关于常规连续通带多工器的设计方法,多年来国际上已有一些研究成果<sup>[4-6]</sup>,但对于高温超导多工器研究,由于高温超导器件在使用中诸多特殊要求,如由于使用环境在密封真空杜瓦中,在实验调试环节中困难很大;受到高温超导材料制作工艺影响,高温超导材料基片面积小,常见为直径 2 英寸(1 英寸=2.54 cm)晶圆片;高温超导电路制作复杂等等,在这方面研究报道较少,在相关研究报道中<sup>[7,8]</sup>一般采用混合电桥结构来消除滤波器之间相互作用,采用这种设计优点是设计简单,每个通道滤波器可以单独设计,然后使用 3 dB 混合电桥将其连接起来,以消除滤波器之间相互作用;其缺点也是很明显,对于双工器而言,其每路通道都由 2 个 3 dB 混合电桥和 2 个相同的滤波器构成,不仅体积大,而且增大了损耗;而对于多工器则需要更多混合电桥和滤波器组构成,在现实中实现较困难。

本文在高温超导连续通带双工器设计中,采用并联两个部分互补的带通滤波器的方式来实现双工器,与混合电桥式双工器相比,结构上取消了混合电桥的使用,每个通道中只使用一个滤波器,利用连接公共端口的电长度为  $1/4\lambda$  附加线段以及调整滤波器中各个耦合器之间耦合强弱,来消除相互作用,因此这种结构具有体积小、结构紧凑的优势,在有限面积的基片材料上,能够容纳更多数量的信道通路,或者各个信道通道中滤波器能够具有更多极数以实现更加陡峭的滤波选频特性;此外由于电路中没有使用混合电桥,整个双工器具有更低的插入损耗。但是在双工器的设计中并联两个滤波器,将在设计中使用仿真软件仿真的时间成倍增长。为了减少设计时间

和难度,这里采用单终端低通原型的带通滤波器近似替代双工器通带中带通滤波器,以构成一组部分互补的滤波器,即双工器中的带通滤波器的设计采用的是单终端低通原型综合而得到滤波器的初始值<sup>[9]</sup>,再利用全波分析仿真软件 IE3D 对这两个滤波器各个耦合器之间的耦合缝隙大小以及谐振器长度进行优化调整,来抵消滤波器之间的寄生参数的影响,从而消除滤波器之间相互作用。

## 2 高温超导连续通带双工器结构

使用一个公共端口作为公共接点,两侧通过附加线段( $\theta_1, \theta_2$ )并联两个单终端低通原型的带通滤波器,以构成一组部分互补的滤波器,原理框图如图 2。

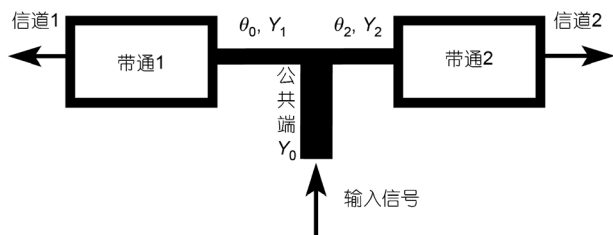


图2 高温超导连续通带双工器原理框图

其中附加线段的电长度 $\theta_1, \theta_2$ 为相应通带中心频率的  $1/4\lambda$  长,作用是部分消除滤波器之间的相互影响以及起一个阻抗转换作用。从公共端口看进去,两个滤波器是并联,因此公共端口处的输入导纳实部: $ReY_0=ReY_1+ReY_2$ ( $Y_1, Y_2$  为相应通带内滤波器的输入导纳)。单终端低通原型的带通滤波器的综合设计与常用的双终端低通原型的带通滤波器的综合设计步骤相同,只是在低通元件到带通元件变换中,元件数值取自单终端低通原型的元件数值表。上述步骤得到的综合设计值只是初值,使用全波分析软件 IE3D 对两个带通滤波器各个谐振器之间的耦合缝隙大小以及谐振器长度进行优化仿真调整,得到最终设计结构尺寸。

## 3 高温超导连续通带双工器制作和测试

为了验证设计结果,分别使用常规金属材料 and 高温超导材料制作了两个四极连续通带双工器,设计指标为:通带 3~4 GHz 连续双通道,单个通道带宽为 500 MHz,即通道 1 频率范围为 3~3.5 GHz,通道 2 频率范围为 3.5~4 GHz。高温超导材料选用直径 2 英寸双抛  $LaAlO_3$  衬底上外延生长的钇系高温超导薄膜的  $YBa-2Cu-3O-7$ (YBCO):介电常数 $\epsilon_r$ : 23.8;基片厚

度  $h$ : 0.5 mm; 常规金属材料选用 Arlon 公司 AD350 基片: 介电常数  $\epsilon_r$ : 3.5; 基片厚度  $h$ : 0.5 mm.

单个通道内带通滤波器相对带宽大于 10%, 属于中宽带滤波器, 常见的平行耦合结构的带通滤波器要做到这么宽的带宽, 需要谐振器间的强耦合, 即要求谐振器间的间隙微小而且精确, 这在实际工艺中很难达到的, 因此滤波器采用了电感输入耦合的半波长开口环谐振器的结构, 开口环谐振器开口相对或相背使谐振器处于强电容耦合或强电感耦合状态, 从而这种结构的滤波器容易获得较宽的带宽. 单终端切比雪夫 4 级低通原型 0.1 dB 纹波下元件数值为:  $g_0=\infty$ ,  $g_1=0.5544$ ,  $g_2=1.1994$ ,  $g_3=1.4576$ ,  $g_4=1.2459$ ,  $g_5=1$ ,  $\omega'=1$ , 利用文献[9]提供的半波长开口环滤波器综合设计方法, 得到滤波器设计初值, 再使用全波分析软件 IE3D 对两个带通滤波器各个开口环谐振器之间的耦合缝隙大小以及谐振器长度进行优化仿真调整, 得到最终设计结构尺寸, 高温超导连续通带双工器设计电路如图 3.

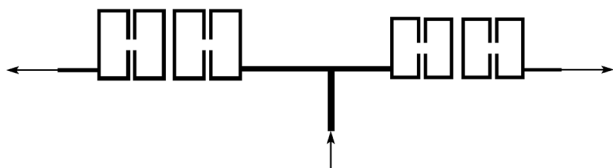


图3 高温超导连续通带双工器电路图

制作实物照片如图 4, 常规双工器体积为 53 mm × 46 mm × 14 mm, 高温超导双工器体积为 39 mm × 20 mm × 11 mm, 后者体积仅是前者体积的 1/4.

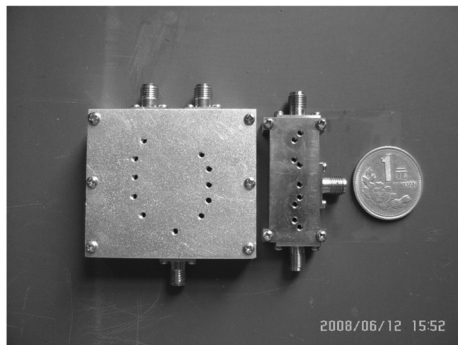


图4 常规和高温超导连续通带双工器实物对比

使用 Agilent 8720E 矢量网络分析仪分别对制作的常规与高温超导双工器进行测试, 测试结果如图

5(a)和(b), 其中高温超导双工器测试在液氮温区 77 K, 测试结果达到: 通带内插损小于 0.8 dB, 通带间带外抑制大于 30 dB@通带中心频率. 两者测试结果比较, 高温超导双工器比常规双工器通带内插入损耗减少 2 dB.

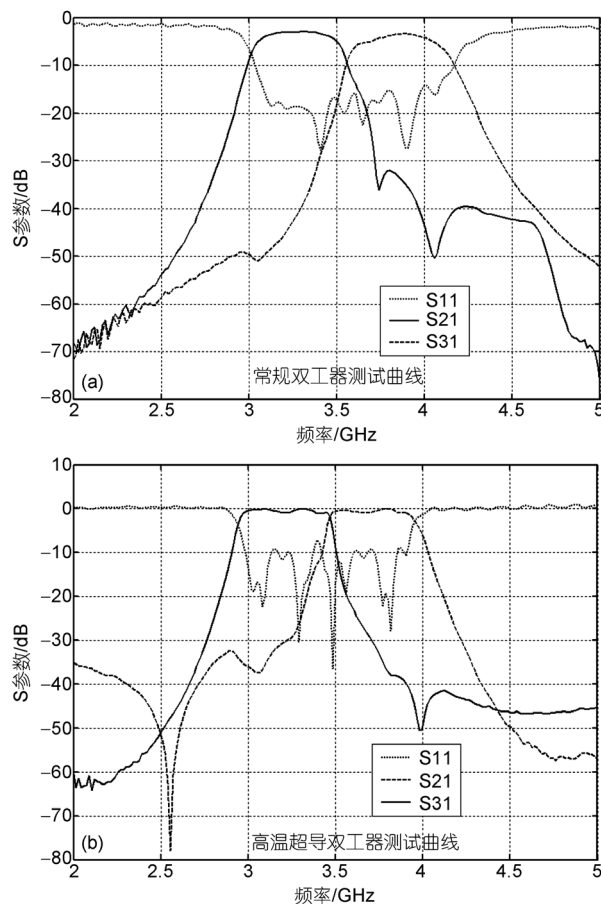


图5 不同类型双工器测试曲线图

(a) 常规双工器; (b) 高温超导双工器

## 4 结论及展望

本文根据高温超导电路的特点提出了高温超导连续通带双工器设计方法, 分别制作高温超导双工器和常规双工器, 得到实验验证. 通过两者测试结果比较, 高温超导双工器比常规双工器具有体积小, 插入损耗低的巨大优势; 与常见的混合电桥结构超导双工器比较, 虽然设计难度增加了, 但是其具有结构紧凑、插入损耗更小的优点, 而且在结构上更易于实现. 高温超导连续通带双工器设计经验, 对下一步研制高温超导连续通带多工器提供了很好的借鉴, 对未来高温超导信道化接收机系统的研究和设计具有重要的意义.

面对战场日益复杂的通讯环境以及未来电子战需要,要求战时通讯侦查系统具有更强大的信息截获能力,因此需要一种新的设计思路来提高信息获取系统的整体性能.而具有极低的系统噪声、极高的灵敏度和频率分辨率、超宽的频率覆盖率等多项优势的以高温超导多工器为核心器件所构建的信道化接收机正是一种具有美好应用前景先进的解决方案之一.经过将

来进一步系列化努力工作后,高温超导信道化接收机可推广应用于覆盖 Ku, X, C, S, L, P, UHF, VHF 以及 HF 等波段的高性能雷达、电子对抗以及宇航通信等系统中,既可运用于宽带(1~3 个倍频程)接收机系统,还可以运用于超宽带接收机系统(如 2~18 GHz),加强抗干扰能力、提高接收灵敏度以及频率分辨率,从而能够实现真正意义上 100%全概率全方位接收机.

## 参考文献

- 1 Mansour R R, Romano T, Ye S, et al. Development of space qualifiable HTS communication subsystems. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2001, 11(1): 806—811
- 2 Mansour R R. High temperature superconductor communication satellite subsystems. *Microwave Conference*, 2000 Asia-Pacific: 587—591
- 3 Jeffries R F, Greed R B, Voyce D C, et al. Further development of a future ESM channeliser with high temperature superconducting filters. *IEEE Trans. Appl Superconduct*, 2001, 11(1): 410—413
- 4 Rhodes J D, Levy R. A generalized multiplexer theory. *IEEE Trans MTT*, 1979, 27: 99—111
- 5 Rhodes J D, Levy R. Design of General manifold multiplexer. *IEEE Trans MTT*, 1979, 27(2): 111—123
- 6 Egri R G, Williams A E, Atia A E. A contiguous-band multiplexer design. *Microwave Symposium Digest, MTT-S Inter*, 1983, 83(1): 86—88
- 7 Mansour R R, Rammo F, Dokas V. Design of hybrid-coupled multiplexers and diplexers using asymmetrical superconducting filters. *Microwave Symposium Digest, MTT-S Inter*, 1993, 3: 1281—1284
- 8 Talisa S H, Janocko M A, Meier D J, et al. High temperature superconducting space-qualified multiplexers and delay lines. *IEEE Trans MTT*, 1996, 44(7): 1229—1239
- 9 Zhang T L, Yang K, Ning J S, et al. Development of miniature HTSC wide-band filter with open-loop resonators. *Chin Sci Bull*, 2008, 53(9): 1300—1303

· 动 态 ·

## 电子动量关联谱奇异 finger 结构的微观物理机制

电子间的关联体现在从同一个原子电离出来的两个光电子倾向于以相同速度沿场的同一方向发射,从而在动量关联谱中聚集出两个鸡蛋形的亮斑.随着实验精度的提高,发现动量关联谱实际上表现为 finger 结构,其物理机制不清楚.北京大学应用物理与技术研究中心刘杰与合作者发展了一套半经典模型,巧妙地将量子隧穿和经典再散

射结合起来.利用该半经典模型,通过详细的数值计算和理论分析,他们发现电子与母核之间的库仑长程相互作用对 finger 结构的形成起到了决定性作用;同时通过在亚阿秒时间精度上追踪电子的运动轨迹,揭示了 finger 结构背后的微观物理机制.相关研究论文发表在 2008 年 12 月 5 日 *Phys Rev Lett*, 101, 233003 上.

## 自旋-轨道耦合对碳纳米管量子点 Kondo 效应的影响

中国科学院近代物理研究所房铁峰和左维与兰州大学罗洪刚合作,研究了自旋-轨道耦合作用对 Kondo 效应的影响.他们发现,自旋-轨道耦合作用可使量子点中单个电子的简并度大大升高,破坏了其 SU(4)对称性,使 Kondo 效应的零场共振峰发生分裂.在外加磁场条件下,

因自旋-轨道耦合和 Zeeman 效应, Kondo 共振峰进一步破裂,形成精细的多峰结构,而且每个峰可通过微观共隧穿过程被唯一确定.研究人员还预言在双电子体系存在纯粹的轨道 Kondo 效应.相关研究论文发表在 2008 年 12 月 12 日 *Phys Rev Lett*, 101, 246805 上.

信息来源:科技部基础研究司,科技部基础研究管理中心