工作在 90 K 以上的超导滤波器研制

夏侯海, 周春霞, 左涛, 何明, 季鲁, 周铁戈, 赵新杰, 方兰, 阎少林*

南开大学电子系, 天津 300071

* 联系人, E-mail: zlyan@nankai.edu.cn

2009-01-05 收稿, 2009-03-13 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: 2008 00551009)资助项目

摘要 报道了一个最高工作温度可达 93 K 的高温超导带通滤波器研制及其特性. 滤波器工作在 S 波段, 相对带宽为 4%, 使用 $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 超导薄膜制作而成. 实验结果表明: 在 93 K 温度以下, 通带内插入损耗小于 0.22 dB, 回波损耗好于 20 dB, 带外抑制大于 80 dB. 对滤波器在不同温度下工作特性进行了测试和分析, 显示该滤波器在 90 K 左右性能稳定, 工作正常. 在已经报道的高温超导滤波器中, 这一工作温度是最高的. 该研究结果对超导滤波器应用于高灵敏度微波通信领域很有意义.

关键词

$\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 薄膜
高温超导滤波器
温度性能

制作高性能的超导滤波器是高温超导薄膜的一项重要应用. 目前制作高温超导滤波器主要使用 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 和 $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Ti-2212) 薄膜, 其中 YBCO 薄膜的临界温度为 90 K 左右, Ti-2212 薄膜的临界温度为 105 K 左右^[1-5]. 现有文献中记载和论述的超导滤波器大多数工作在 77 K 左右, 在这个温度下滤波器工作性能优良^[6-8]. 然而对一些特殊应用而言, 要求超导滤波器在更高温度(比如 90 K 左右)下工作, 这样不仅能够降低对制冷设备性能的要求, 节约成本, 同时又能扩大滤波器的工作温度范围, 提高滤波器的稳定性.

为了实现工作在更高温度下的超导滤波器, 我们设计了一个工作在 S 波段的滤波器. 该滤波器采用 Ti-2212 薄膜, 制作在 LaAlO_3 (001) 基片上. 在 93 K 温度下对滤波器进行测试, 结果显示滤波器通带内的插入损耗小于 0.22 dB, 回波损耗好于 20 dB, 带外抑制大于 80 dB, 与 77 K 温度下各项测试指标非常接近; 对该滤波器在不同温度下性能分析表明其

工作在 90 K 左右时性能稳定.

1 滤波器设计

我们设计的超导滤波器工作在 S 波段, 中心频率为 2.6 GHz, 相对带宽为 4%, 采用 10 阶切比雪夫滤波器结构. 图 1 为滤波器的理论频率响应, 图中已对频率归一化处理. 该类滤波器一般设计方法是: 首先根据指标要求, 计算出所需要的滤波器阶数; 然后通过查表或计算得到低通原型滤波器的 g 值, 计算出需要的耦合系数和外部耦合因子; 最后按照这些数据通过电磁仿真确定相邻谐振器的距离, 优化滤波器整体结构^[9]. 这种方法虽然简单, 但是整体优化滤波器时很费时间. 这里我们对用单端口群时延法调试微波滤波器的方法进行改良, 用于指导微带滤波器的仿真设计, 可以节省优化时间, 具体设计过程可以参阅有关文献^[10], 不再详述.

本设计采用 Sonnet's em 软件完成仿真过程. 仿真时采用 0.5 mm 厚的 LaAlO_3 基片, 介电常数取 23.6,

引用格式: 夏侯海, 周春霞, 左涛, 等. 0B 工作在 90 K 以上的超导滤波器研制. 科学通报, 2009, 54: 2421~2424

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, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0225-0

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-16-2421>

图 1 滤波器理论特性曲线

版图如图 2 所示. 从图中可以看到, 我们采用了螺旋状弯曲线半波长微带谐振器, 与常用的 U 型结构相比, 这种结构可以提高微带谐振器 Q 值, 减小滤波器的尺寸, 超导滤波器芯片的最终尺寸为 $34\text{ mm} \times 10\text{ mm}$.

从图 2 中可以看到, 每两个相邻谐振器关于它们的中间线反对称, 这样最终得到的 10 阶滤波器也是关于中间线反对称. 经研究发现, 由于相邻谐振器的这种位置关系, 使得非相邻谐振器之间的交叉耦合降到最低, 减少不必要的交叉耦合; 同时这种结构也让仿真设计变得简单, 只需要优化前 6 个谐振器组成的单端口网络, 然后根据滤波器反对称结构特点, 得到完整的 10 阶滤波器, 再经过优化, 就可获得很好的频率响应, 从而大大减少仿真时间.

图 2 10 阶超导滤波器版图

图 3 为滤波器的仿真曲线, 图中频率已经归一化. 由于采取了合理的谐振器结构和滤波器结构, 使得非相邻谐振器之间交叉耦合可以忽略不计, 因此仿真得到的滤波器中心频率、带宽和回波损耗等特性和理论特性非常吻合.

图 3 滤波器仿真特性曲线

2 制作与测试

超导薄膜质量好坏直接影响到滤波器性能优劣. 我们在两英寸 LaAlO_3 衬底上制备双面 Tl-2212 薄膜^[5]. 首先用磁控离子溅射的方法在衬底上淀积出 Tl-Ba-Ca-Cu-O 非晶先驱薄膜, 淀积好一面先驱薄膜后, 将基片翻转, 淀积另一面; 然后进行高温热处理使非晶先驱薄膜转变超导转变成 Tl-2212 超导薄膜. 测试表明, 制作的两英寸超导薄膜厚度不均匀度小于 5%, 正反两面的转变温度在 105 K 左右, 在 77 K 温度下, 薄膜临界电流密度大于 $2 \times 10^6\text{ A/cm}^2$, 表面电阻约为 $400\text{ }\mu\Omega$ (10 GHz, 77 K).

为了使基片正面上微带线很好地与转换接头相连, 反面上的超导膜与屏蔽盒焊接在一起, 分别在正反面超导膜上蒸镀了一层金膜. 我们利用正胶光刻和氩离子干法刻蚀在基片正面上制作出滤波器的图形, 制作好的滤波器芯片装配在一个铜制的屏蔽盒内, 采用 SMA 接头连接滤波器的输入输出端, 如图 4 所示.

我们使用 Agilent 矢量网络分析仪 HP8753ES 测量滤波器的工作特性, 滤波器放置在真空环境中, 由制冷机制冷, 温度可以调节. 图 5 为在 93 K 温度下滤波器未经过调谐的测试特性(网络分析仪的输入功率为 $0\text{ dB} \cdot \text{m}$), 通带内的插入损耗为 0.22 dB, 回波损耗达到 22 dB 左右; 与理论设计值相比, 中心频率向下偏移了约 5 MHz, 带宽减小了 4 MHz.

图4 超导滤波实物图

图5 93 K下滤波器测试特性曲线

滤波器的实测中心频率和带宽与设计值相比存在差异主要原因是, 实际使用的 LaAlO_3 基片厚度和介电常数与仿真设计时所取值存在误差. 根据敏感度分析^[9], 基片厚度变化主要影响谐振器之间的耦合, 从而改变滤波器的带宽, 同时也会导致中心频率的偏移; 介电常数偏差主要影响谐振器的谐振频率, 因而也会使得滤波器中心频率偏移. SMA接头和滤波器输入输出端需要经过焊接才能连接, 这会造成它们不完全匹配, 所以实测回波损耗低于设计值. 由于回波损耗已经达到了一般工程应用指标要求, 故没有安装螺钉做进一步的调谐.

3 温度特性分析

考虑到制冷机制冷温度具有波动性, 因此为了确保滤波器在 90 K 左右时能稳定工作, 有必要对滤

波器在不同温度下工作特性进行详细分析. 图 6 为滤波器在不同温度下的传输损耗曲线(为了清晰, 只画出 5 条). 可以看到, 随着温度增加, 滤波器插入损耗在逐渐增大, 中心频率则逐渐减小, 在 95 K 温度以下, 带宽几乎不变.

图6 不同温度下滤波器测试曲线

图 7 给出了更为详细的插入损耗随温度变化趋势, 在 77, 93, 95 K 温度下, 通带内插入损耗分别为 0.1, 0.22, 0.58 dB, 温度进一步提高, 插入损耗急剧增大. 图 7 内还给出了 TL-2212 超导薄膜表面电阻 R_s (10 GHz) 随温度变化的关系, 可见滤波器的插入损耗随温度变化与薄膜表面电阻随温度变化关系基本一致, 说明滤波器的插入损耗主要由超导薄膜的表面电阻引起的. 在 (90 ± 3) K 时, 表面电阻变化小于 $40 \mu\Omega$, 插入损耗变化小于 0.04 dB, 可以忽略.

图7 插入损耗随温度变化曲线

图 8 为滤波器中心频率随温度变化曲线, 纵坐标为实测中心频率的相对值(参照设计值). 从图中可以看到, 随着温度的增加, 超导滤波器的中心频率将向低频方向偏移. 我们认为, 在 95 K 以下, 中心频率的偏移主要是由于 LaAlO_3 基片介电常数随温度变化的造成的, 该介电常数随温度升高将有所增加^[11], 导致微带谐振器的谐振频率减小, 从而滤波器的中心频率将向低频偏移. 从 95 K 到薄膜临界温度中心

图 8 中心频率随温度变化曲线

频率急剧变化, 主要是由于超导薄膜动态电感效应引起的. 从图 8 中可以看到在 (90 ± 3) K 时滤波器的中心频率偏移在 $\pm 0.05\%$ 之间, 这可以通过适当增加带宽加以调整.

通过以上分析可知, 该超导滤波器工作在 90 K 时, 温度变化在 ± 3 K 之内时, 对其中心频率、带宽和插入损耗的影响可以忽略, 从而说明该滤波器可以稳定工作在 90 K 附近.

4 结论

我们详细描述了一个超导滤波器的完整设计、制作和测试过程. 为了实现工作在更高温度的超导滤波器, 我们在 5.08 cm, 0.5 mm 厚的 LaAlO_3 衬底上, 用 Tl-2212 超导薄膜制作了一个 10 阶切比雪夫滤波器. 由 93 K 下的测试结果和对不同温度下滤波器的特性分析表明, 该滤波器工作在 90 K 左右时性能稳定可靠. 与其他工作在 77 K 下超导滤波器相比, 我们把滤波器的最高工作温度提高到 93 K, 这不仅降低了对制冷设备的要求, 节约了成本, 同时又增大了超导滤波器工作温度范围, 提高了滤波器性能的稳定性, 对超导滤波器应用于微波通信领域很有意义.

参考文献

- 1 Aidam R, Geerk J, Linker G, et al. Y-Ba-Cu-O thin films on 3" sapphire wafers for microwave devices. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2001, 11: 357—360 [\[DOI\]](#)
- 2 Face D W, Small R J, Warrington M S, et al. Large area $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ thin films for microwave and electronic applications. *Physica C*, 2001, 357-360: 1488—1494 [\[DOI\]](#)
- 3 Schneidewind H, Manzel M, Bruchlos G, et al. $\text{TlBaCaCuO}(2212)$ thin films on lanthanum aluminate and sapphire substrates for microwave filters. *Supercond Sci Technol*, 2001, 14: 200—212 [\[DOI\]](#)
- 4 Liu X Z, Tao B W, Deng X W, et al. The preparation of two inch double-sided YBCO thin films. *Supercond Sci Technol*, 2002, 15: 1698—1700 [\[DOI\]](#)
- 5 Yan S L, Fang L, He M, et al. TlBaCaCuO thin films on 2 in. $\text{LaAlO}_3(001)$ substrates. *Cryogenics*, 2005, 45: 41—44 [\[DOI\]](#)
- 6 Soares E R, Fuller J D, Marozick P J, et al. Applications of high-temperature-superconducting filters and cryo-electronics for satellite communication. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48: 1190—1198 [\[DOI\]](#)
- 7 Willemsen B A. HTS filter subsystems for wireless telecommunications. *IEEE Trans Appl Superconduct*, 2001, 11: 60—67 [\[DOI\]](#)
- 8 Hong J S, Lancaster M J, Jedamzik D, et al. On the development of superconducting microstrip filters for mobile communications applications. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999, 47: 1656—1663 [\[DOI\]](#)
- 9 Hong J S, Lancaster M J. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Chichester: Wiley, 2001
- 10 Ness J B. A unified approach to the design, measurement, and tuning of coupled-resonator filters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1998, 46: 343—351 [\[DOI\]](#)
- 11 Konopka J, Wolff I. Dielectric properties of substrates for deposition of high- T_c thin films up to 40 GHz. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1992, 40: 2418—2423 [\[DOI\]](#)