

文章编号:1005-6122(2005)04-0037-04

各向异性衬底上的高温超导(HTS)微带天线*

刘淑芳^{1,2} 官伯然²

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071;

2. 杭州电子科技大学电子信息分院, 杭州 310018)

摘要: 分析了各向异性衬底上的高温超导微带天线特性。选取两种典型的高温超导各向异性介质—— GaNdAlO_3 和 SrLaAlO_4 作为高温超导微带天线的衬底, 采用各向异性媒质中的谱域矩量法, 对微带天线的输入阻抗和辐射效率进行了计算。计算和分析结果表明, 高温超导衬底的各向异性特性会影响高温超导微带天线的性能, 而且这种影响因衬底而异, 同时, 衬底特性随温度的变化也将影响天线的性能。

关键词: 各向异性衬底, 高温超导, 微带天线

The High-Temperature Superconductor Microstrip Antenna on Anisotropic Substrates

LIU Shu-fang^{1,2}, GUAN Bo-ran²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electronic and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The performances of HTS microstrip antennas on anisotropic substrates are studied in this paper. The input impedance and radiation efficiency of HTS microstrip antennas on two typical HTS anisotropic substrates, GaNdAlO_3 and SrLaAlO_4 , are calculated using the modified spectral domain moment method in anisotropic materials. The results show that the anisotropic property of high-temperature superconductor substrates have an influence on the performances of HTS microstrip antennas, which varies with substrates, while the variation of the properties of HTS substrates with the temperature also affects the performances of antennas.

Key words: Anisotropic substrate, High-temperature superconductor(HTS), Microstrip antenna

引言

自1987年首次发现转变温度超过液氮(77K)的高温超导体以来, 超导体在微波器件方面获得了广泛的应用, 用高温超导薄膜制成的滤波器、延迟线以及相移器等都具有前所未有的高性能。天线也是一种因高温超导而获益的微波元件, 采用高温超导材料能够大大提高天线的辐射效率和增益, 尤其作为大型天线阵的馈电网络时, 这种优势更为明显。

高温超导材料是一种很特殊的材料, 它不仅与传统的导体如铜、铝、金、银等有很大的不同, 而且与低温超导体铌、锡、氮化铌等也是不同的。对大部分

微波应用来说, 高温超导体必须是制备在晶格匹配衬底上的外延晶体薄膜。许多衬底材料显示出与那些常规金属或低温超导材料完全不同的性质, 大多都具有很高的介电常数, 而且有些是各向异性的。这些衬底的介电特性 ϵ_r 和 $\tan\delta$ 都是频率、温度和晶体取向(对非立方体结构)的函数^[1]。

为了进一步了解这些衬底特性对高温超导微带天线的影响, 本文选取了两种典型的各向异性高温超导衬底, 对衬底上的 HTS 微带天线进行了研究。

1 超导体的表面阻抗

在微波频率下, 超导体具有比常规导体小得多

* 收稿日期:2004-05-25;定稿日期:2004-09-27

的表面电阻,其表面阻抗计算公式为^[1]:

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (1)$$

$$R_s = \frac{1}{2} \omega^2 \mu^2 \lambda_L^3 \sigma_N \left(\frac{n_n}{n} \right) \quad (2)$$

$$X_s = \omega \mu \lambda_L \quad (3)$$

式中, ω 为角频率, μ 为磁导率, σ_N 为超导体处于正常状态下的电导率, λ_L 为伦敦穿透深度, n_n/n 为常规电流的载流子密度和总载流子密度的比值。其中, λ_L 和 n_n/n 都是温度的函数。由式(2)可以看到,超导体的表面电阻 R_s 正比于 ω^2 ,这与常规金属导体的 $\omega^{1/2}$ 依赖关系是完全不同的。

2 介质特性描述

各向异性媒质的特性表示为:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tan \bar{\delta} = \begin{bmatrix} \tan \delta_x & 0 & 0 \\ 0 & \tan \delta_x & 0 \\ 0 & 0 & \tan \delta_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

高温超导衬底的这些参数都是频率和温度的函数。

GaNdAlO_3 和 SrLaAlO_4 ^[2] 在各向异性高温超导衬底中具有一定的代表性: GaNdAlO_3 的 $\epsilon_x > \epsilon_z$, 温度升高时, ϵ_x 减小, ϵ_z 增大, $\tan \delta_x$ 减小, 而 $\tan \delta_z$ 在 70K 以下时随温度的升高而增大, 在 70K 以上时随温度的升高而减小; SrLaAlO_4 的 $\epsilon_x < \epsilon_z$, $\epsilon_x, \epsilon_z, \tan \delta_x$ 和 $\tan \delta_z$ 都随温度的升高而增大。从对这两种衬底的介电参数的描述,可以看出高温超导衬底特性的复杂性。在这里没有描述它们随频率的变化,是因为文献[2]中的数据表明这些参数从 5GHz 到 40GHz 变化非常小,可以忽略其影响。 GaNdAlO_3 和 SrLaAlO_4 在 20K 和 70K 下的介电参数列于表 1。

表 1 GaNdAlO_3 和 SrLaAlO_4 的介电参数

GaNdAlO_3 (20K)	GaNdAlO_3 (70K)	SrLaAlO_4 (20K)	SrLaAlO_4 (70K)
19.965	19.894	16.825	16.829
17.296	17.396	19.501	19.531
2.310×10^{-3}	9.12×10^{-4}	2.397×10^{-4}	3.680×10^{-4}
8.398×10^{-4}	1.05×10^{-3}	3.927×10^{-4}	5.100×10^{-4}

3 计算和分析

为研究不同温度下不同各向异性高温超导衬底

上高温超导微带天线的特性,采用各向异性媒质中的谱域矩量法^[3]计算了 20K 和 70K 下 GaNdAlO_3 和 SrLaAlO_4 两种各向异性衬底上的高温超导微带天线的输入阻抗和辐射效率,同时为了明确各向异性媒质对微带天线的影响,还计算了相同温度下各向同性衬底上高温超导微带天线的相关特性,并且进行了比较分析。

微带天线的结构如图 1 所示。高温超导薄膜参数^[4]:临界温度 $T_c = 90\text{ K}$, 伦敦穿透深度 $\lambda_0 = 0.22\text{ }\mu\text{m}$, 表面电阻 $R_s = 7.97651 \times 10^{-6}\Omega$ (1.5GHz, 77K)。贴片参数: GaNdAlO_3 衬底对应 $L = W = 3.00\text{ mm}$, 馈电点位置 $(x_p, y_p) = (1.2, 0.0)$; SrLaAlO_4 衬底对应 $L = W = 2.82\text{ mm}$, $(x_p, y_p) = (1.2, 0.0)$ 。

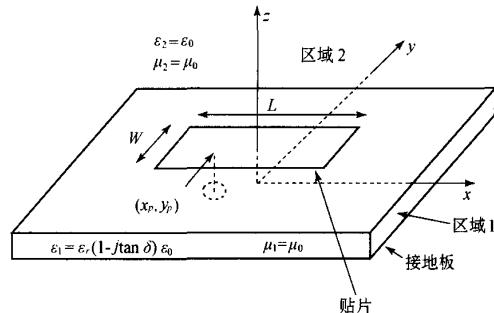


图 1 微带贴片天线

计算结果示于图 2~图 7。这里,辐射效率是辐射功率与输入功率的比值。图例中的“ $\epsilon_x = \epsilon_z$, $\tan \delta_x = \tan \delta_z$ (70K) 等”就是假设的各向同性衬底的情况,在数值上,以 GaNdAlO_3 为例,“ $\epsilon_x = \epsilon_z$, $\tan \delta_x = \tan \delta_z$ (70K)”,即为“ $\epsilon_x = \epsilon_z = 17.396$, $\tan \delta_x = \tan \delta_z = 1.05 \times 10^{-3}$ ”(参见表 1 中的数据)。

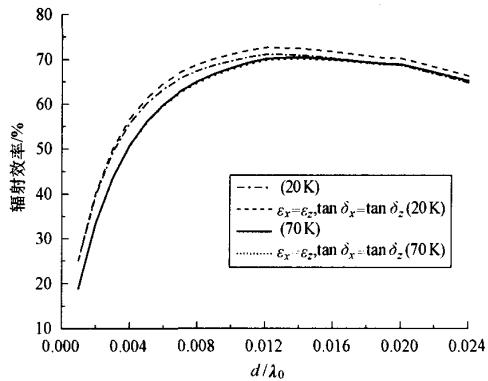


图 2 GaNdAlO_3 衬底微带天线的辐射效率
随衬底厚度的变化

图 2 是以 GaNdAlO_3 为衬底的高温超导微带天

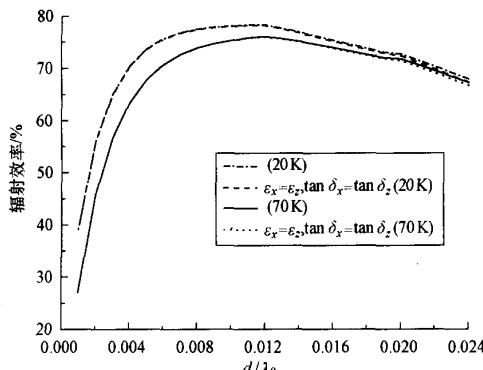


图3 SrLaAlO₄衬底微带天线的辐射效率
随衬底厚度的变化

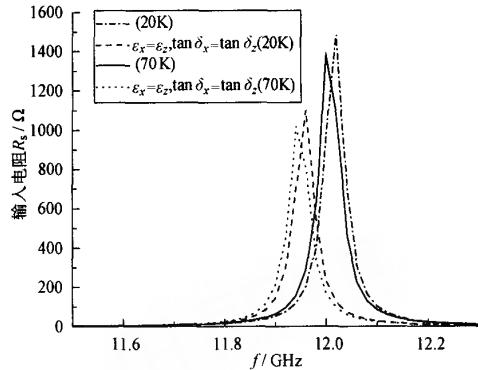


图6 SrLaAlO₄衬底微带天线的输入电阻

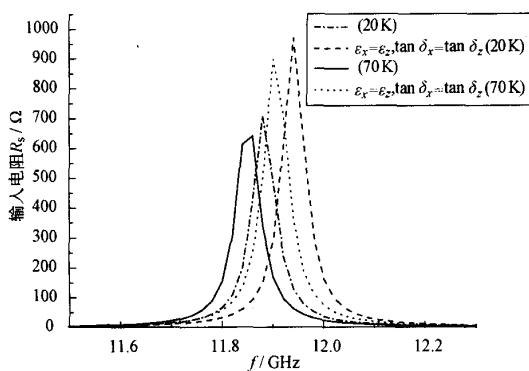


图4 GaNdAlO₃衬底微带天线的输入电阻

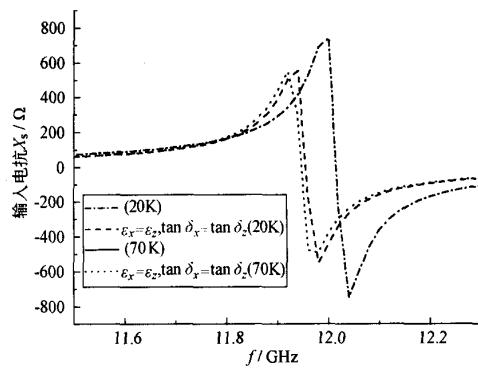


图7 SrLaAlO₄衬底微带天线的输入电抗

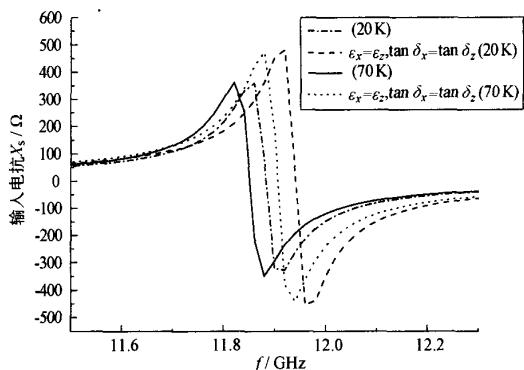


图5 GaNdAlO₃衬底微带天线的输入电抗

线的辐射效率曲线。从图中可以看出, 温度为 70K 时, 各向同性衬底和各向异性衬底上的天线辐射效率几乎相等, 而 20K 时天线的辐射效率相差比较大, 这是因为 70K 时 GaNdAlO₃ 衬底的损耗角正切 $\tan\delta_x$ 与 $\tan\delta_z$ 相差很小, 而 20K 时, $\tan\delta_x$ 与 $\tan\delta_z$ 相差很大; 再对 20K 和 70K 下的两组曲线进行比较可以看出, 20K 时的辐射效率大于 70K 时的辐射效率。图 3 是以 SrLaAlO₄ 为衬底的高温超导微带天线的辐射效率曲线。该图显示, 在相同温度下的各

向同性衬底和各向异性衬底上的天线辐射效率几乎相等, 这是因为 SrLaAlO₄ 衬底的各向异性度比较小, 损耗角正切 $\tan\delta_x$ 与 $\tan\delta_z$ 之间的差别很小的缘故; 从该图还可以看出 20K 时的辐射效率也大于 70K 时的辐射效率。因此, 从图 2 和图 3 可以得出以下结论: 辐射效率随温度的改变主要是由天线表面电阻的变化引起的, 这是各向异性度比较小的情况; 当各向异性度比较大时, 损耗正切的变化也会较大幅度地影响辐射效率。

图 4 和图 5 是 GaNdAlO₃ 衬底上的高温超导微带天线的输入阻抗曲线。从两图可以看出, 相同温度下各向异性衬底天线和各向同性衬底天线相比, 其输入电阻减小, 谐振频率降低, 这是因为 $\epsilon_x > \epsilon_z$ 的缘故。图 6 和图 7 是 SrLaAlO₄ 衬底上的高温超导微带天线的输入阻抗曲线。两图中的曲线表明, 相同温度下各向异性衬底天线的输入电阻增大, 谐振频率升高, 这是因为 SrLaAlO₄ 衬底的 $\epsilon_x < \epsilon_z$ 。比较图 4~图 7 中 20K 和 70K 下的两组曲线可以看出, 温度降低时, 天线的输入电阻增大, 谐振频率升高。

(下转第 42 页)

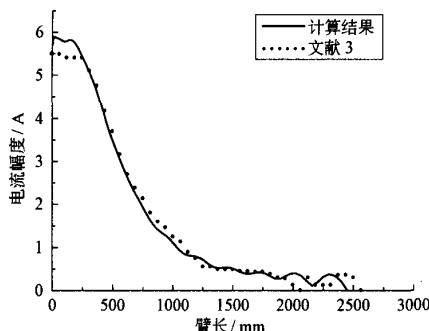


图 2 600MHz 的电流分布

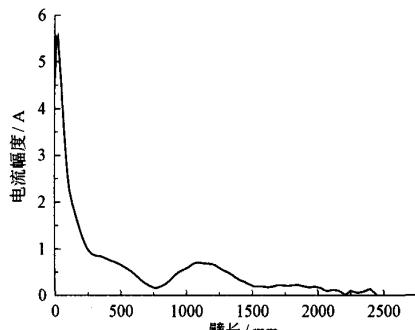


图 3 1200MHz 的电流分布

3 结论

用矩量法求解了 Nakano 方程, 得到了双臂圆锥对数螺旋天线的电流分布, 此方法编程容易, 精度高, 解决了任意形状线天线的分析问题。

(上接第 39 页)

4 结束语

对各向异性衬底上的高温超导微带天线进行了计算和分析, 结果表明, 高温超导衬底的各向异性特性会对高温超导微带天线的性能产生影响, 而且这种影响因衬底特性的不同而不同, 同时衬底特性随温度的变化也将影响天线的性能。所以在设计高温超导微带天线时, 必须对高温超导衬底的介电特性进行仔细的测量, 并分析其随环境的变化趋势, 以预估高温超导微带天线的性能。

参 考 文 献

- [1] 沈致远. 高温超导微波电路. 盛克敏, 王素玉译. 北京: 国防工业出版社, 2000

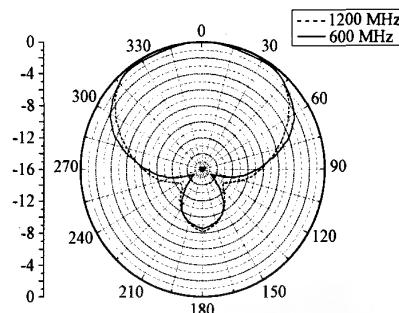


图 4 不同频率方向图的比较

参 考 文 献

- [1] Mei K K. On the equations of thin wire antennas. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 1965, 13(5): 374 ~ 378
- [2] Nakano H. *Helical and Spiral Antennas: A Numerical Approach*. Letchworth, Hertfordshire, England: Research Studies Press, 1987
- [3] YuShan Yeh, Mei K K. Theory of coacial equiangular-spiral antennas part I - numerical technique. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 1967, 15(9): 634 ~ 639

杨 放 1977 年生, 1998 年毕业于北京师范大学电子学系, 2004 年于西北工业大学获工学硕士学位, 现为西北工业大学电磁场与微波技术专业博士研究生, 任西安建筑科技大学信息与控制工程学院讲师, 主要研究领域为电路理论与电磁场理论。

E-mail: yangfangbnu@tom.com

- [2] Konopka J, Wolff I. Dielectric properties of substrates for deposition of high-Tc thin films up to 40 GHz. *IEEE Trans on MTT*, 1992, 40(12): 2418 ~ 2423
- [3] Pozar D M. Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate. *IEEE Trans on Antenna Propagation*, 1987, 35(6): 613 ~ 621
- [4] Oates D E, Anderson A C. Stripline resonator measurements of Z_s versus H_n in thin films. *IEEE Trans on MTT*, 1991, 39(9): 1522 ~ 1529

刘淑芳 女, 现为西安电子科技大学在读博士生。研究方向: 高温超导微带天线, 微波电路等。

E-mail: shuf_l@xinhuanet.com

官伯然 男, 博士、教授、博士生导师、中国电子学会高级会员。主要从事超导电子技术和电磁场与微波技术领域的研究工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>