



号 710-0001-军, 军图 51 登同合对科查

中国人民解放军总装备部专项基金资助出版

册数(91)目录册分并图

料王港王, 妙火理, 香冠武, 八, 温中庭, 精号, 跌, 高

# 高温超导微波电路

沈致远 著

盛克敏 王素玉 译

王家素 校

国防工业出版社

·北京·

(内容提要: 本书介绍高温超导微波电路的设计)

著作权合同登记 图字:军-1999-017号

图书在版编目(CIP)数据

高温超导微波电路/沈致远著;盛克敏,王素玉译.  
-北京:国防工业出版社,2000.1

书名原文:High-Temperature Superconducting Microwave Circuits Zhi-Yuan Shen Artech House Boston.  
London 1994

ISBN 7-118-02078-8

I. 高… II. ①沈…②盛…③王… III. 高温-超导体-微波电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 16945 号

《高温超导微波电路》(“High-Temperature Superconducting Microwave Circuits”, Artech House, Boston·London, 1994)之中文版权属本人所有,本人愿将该书中文版之版权无偿转让给贵出版社。英文原版作者,Zhi-Yuan Shen 1997年4月4日

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{1}{2}$  248千字  
2000年1月第1版 2000年1月北京第1次印刷

印数:1—1500册 定价:18.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 序

沈致远先生在超导微波电子学上做过系统的研究工作,尤其是在发展高温超导的微波无源器件上,对如何提高高温超导薄膜的微波无源器件的功率容量,做出过重要的贡献。他在微波技术的其他方面,也有多年的研究工作和教学工作的经验。他写的专著《高温超导微波电路》是一本内容丰富、论述清晰、科学水平很高的著作。在书中沈先生系统地介绍了各类超导微波无源、有源器件的工作原理、分析、设计的方法。结合高温超导的特点,对有关的问题作了深入的分析,对在这个领域中工作或学习的读者来说,无疑是一本很好的教材和研究工作的参考书。对更广泛的读者来说,也是一本了解超导在微波技术上的应用的很合适的读本。

由于高温超导电性的发现,超导微波技术已经逐渐走出研究实验室,将要发展成为一门有一定规模的新的应用科学技术,需要学习、了解这个领域的人正在日益增多。我国从70年代以来,就开始了超导微波电子学的研究工作。1987年以后,更投入了较多的力量发展高温超导薄膜和器件,发展高温超导在微波技术上的应用,在这个领域中我国的科学工作者也做出过一定贡献。沈致远先生的这本专著在我国的翻译出版,对我国超导微波电子学的发展,对我国在与超导微波电子学有关领域中工作的科技工作者、大学教师和青年学生都是很有意义的。本书的译者是在微波电子学上有多年研究和教学经验的学者,译文准确流畅,这对读者来说,也是很有帮助的。

中国科学院 院士  
北京大学物理系 教授

甘子刻

1997年10月16日

## 中文版前言

由盛克敏、王素玉两位教授翻译、王家素教授校订的《高温超导微波电路》一书将由国防工业出版社出版发行了。作为原著者，我感到高兴，想借此机会对读者们说几句话。

高温超导体的发现至今已有 10 年了，这被认为是 20 世纪后半叶物理学的一项重大成就。其学术价值已为其发现者 George Bednorz 及 Alex Müller 获得 1987 年诺贝尔物理奖所充分肯定；其实用价值及对社会的影响正在逐渐显示出来。第一个实际应用很有可能是高温超导微波电路，其理由为：（一）高温超导体材料的制备已臻成熟，供制造微波电路用的高质量大面积的双面薄膜衬底已能批量生产。（二）高温超导薄膜具有极为优越的微波性能，可用于制造低损耗（高品质因数）、低噪声及小型化的微波电路，其性能与相应的常规电路相比有数量级的提高。（三）有实际应用的要求，高温超导微波电路在移动电话、卫星通信、医疗仪器及军事方面有实际应用，能大幅度提高这些设备的性能。

目前的问题是如何将这些应用普及推广，在这方面有两个主要障碍：一是高温超导电路对制冷的要求虽然比低温超导的要低得多，但仍然是一个有待解决的问题，需要发展具有高效率、高可靠、长寿命、小体积、而又价格低廉的制冷装置。二是目前高温超导薄膜的价格昂贵，从而阻碍了其推广应用。降低价格的办法是要求大批生产，而大批生产又取决于能否大量推广应用。这是一个“先有鸡还是先有蛋”的典型例子，必须在某一个环节上突破。其实这就是我写这本书的主要动机，想把这一新技术介绍给微波界的同行们，使大家一起努力来推广应用。

自从 1992 年以来，我几次回国访问，曾参观了北京、上海、南

京、杭州、成都及武汉等地的有关研究高温超导的大学及研究机构,亲自看到了国内的同行们在极为困难的物质条件下做出了许多高水平的工作,使我内心感到十分钦佩和感动。有如此优秀的科学家及技术专家们,今后中国在这一前沿领域中取得更大的成就是可以预期的。

17年前国防工业出版社曾出版发行了由我主编的《微波技术》一书,使我感到惊讶的是该书至今仍为一些大学选作教材。我希望《高温超导微波电路》也能在推动这一新技术方面产生积极而持久的影响。

沈致远

1997年7月于杜邦公司中心研究院

## 原 书 前 言

自从 1987 首次发现转换温度 ( $T_c$ ) 超过液氮温度的高温超导体 (HTS) 以来, 在改善高温超导体特性方面已经取得了巨大进展, 可望在实际中得到应用。高温超导薄膜材料在微波频率下, 具有比铜要低 10 至 1 000 倍的表面电阻, 并能实现高达  $10\ 000\ 000\ \text{A}/\text{cm}^2$  的电流密度。已经制造出许多用这些高温超导薄膜材料做成的无源微波器件与电路, 它们具有前所未有的高性能。高温超导有源器件, 例如约瑟夫森结、超导量子干涉器 (SQUID)、超导磁通流晶体管 (SFJT) 也以其令人瞩目的特性得到了发展。普遍认为, 高温超导薄膜材料的最初应用便是高性能微波电路。因为这将 对微波工程产生重大的影响, 现在已经到了对这种新技术和应用作一系统整理的时候了。

本书对这一微波工程和材料科学的交叉学科的基本原理和主要发展作了总结。对微波和系统工程师来说, 它提供了高温超导微波电路设计、制造、特性测量及应用方面的基本框架, 这可能是下一代微波系统进展的重要部分, 对于材料科学的科学家和工程师来说, 它也可作为一种引论, 以便了解微波电路对进一步改善高温超导材料的要求。虽然假定读者已具有电气工程学士的水平, 但除了一些高等数学外, 即使没有上述的背景知识, 本书的大部分内容也都是能理解的。

## 致 谢

本书大部分内容是以杜邦研究发展中心超导小组的工作为基础的,没有同事们的贡献与帮助,我是写不出这本书来的,我深深地感谢他们所有人,我特别要感谢 Alan Lauder 博士,他不断地给我支持与鼓励,我要感谢我的同事 William L. Holstein,他是本书第二章的协作者,他在材料和制造方面的专长使本书在这一专题上增色不少。我还要感谢超导技术公司的 Robert B. Hammond 博士,他阅读了手稿并提出了宝贵的意见和建议。在提供参考材料方面,我要感谢 NASA Lewis 研究中心的 Kul B. Bhasin 博士、马里兰大学的李祺湘教授、高渭楼博士、林肯实验室的 Daniel E. Oates 博士,Conductus 公司的 John S. Martens 博士,以及惠普公司实验室 Robert C. Taber 博士。我非常感谢 Leslie Yu,她在本书的写作过程中,给我以编辑技术方面的建议。我还要感谢杜邦公司的 Susan J. Novak,Artech House 出版公司的 Lisa M. Coveney, John Svatek, Katherine U. Schott, Mark E. Walsh 和 Kim Field 等人在手稿准备、编辑和成书过程中给我的各方面的帮助。

沈致远

Wilmington, Delaware

1994 年 5 月



# 目 录

第1章 引论 .....	1
1.1 历史 .....	1
1.2 低温超导 .....	4
1.3 高温超导 .....	5
参考文献 .....	7
第2章 材料和特性 .....	9
2.1 引言 .....	9
2.2 衬底与特性 .....	10
2.3 高温超导材料和加工 .....	20
2.4 理论 .....	28
2.4.1 迈斯纳效应和伦敦方程 .....	29
2.4.2 二流体模型和表面电阻 .....	32
2.5 临界温度特性 .....	36
2.6 表面电阻特性 .....	39
2.6.1 端面替代法 .....	39
2.6.2 平行板法 .....	42
2.6.3 介质谐振器法 .....	44
2.6.4 共焦反射计法 .....	46
2.6.5 传输线法 .....	47
2.6.6 对各种表面电阻测量方法的评价 .....	48
2.7 临界电流密度特性 .....	50
2.8 非线性效应 .....	52
2.8.1 非线性表面阻抗 .....	53
2.8.2 谐波生成 .....	55

2.8.3 双频调谐互调制 .....	57
2.9 小结 .....	59
附录 2A .....	61
致谢 .....	64
参考文献 .....	64
<b>第3章 传输线</b> .....	<b>73</b>
3.1 引言 .....	73
3.2 平行板传输线 .....	74
3.2.1 完全导体 .....	74
3.2.2 常规金属 .....	76
3.2.3 无限厚超导体 .....	77
3.2.4 有限厚超导体 .....	81
3.3 基本理论 .....	82
3.3.1 场论 .....	82
3.3.2 势函数 .....	85
3.3.3 负介电常数 .....	86
3.3.4 等效边界条件 .....	88
3.4 高温超导传输线 .....	92
3.5 高温超导传输线的应用 .....	98
3.6 小结 .....	105
附录 3A .....	107
参考文献 .....	108
<b>第4章 无源器件</b> .....	<b>110</b>
4.1 引言 .....	110
4.2 谐振器 .....	110
4.2.1 一维谐振器 .....	111
4.2.2 二维谐振器 .....	118
4.2.3 可调谐谐振器 .....	119
4.3 滤波器 .....	121
4.3.1 一维滤波器 .....	121
4.3.2 二维双模滤波器 .....	128

4.4	多工器 .....	130
4.5	功率分配器/合成器 .....	136
4.6	高温超导开关 .....	138
4.7	相移器 .....	144
4.8	天线与馈电系统 .....	146
4.9	小结 .....	154
	致谢 .....	155
	参考文献 .....	155
<b>第5章</b>	<b>有源器件 .....</b>	<b>158</b>
5.1	引言 .....	158
5.2	约瑟夫森效应和约瑟夫森结 .....	159
5.2.1	约瑟夫森效应 .....	160
5.2.2	$I$ - $V$ 曲线和等效电路 .....	169
5.2.3	夏皮罗台阶 .....	172
5.3	高温超导约瑟夫森结 .....	174
5.4	超导量子干涉器(SQUID) .....	179
5.5	超导磁通流晶体管(SFFT) .....	182
5.6	约瑟夫森结的微波应用 .....	187
5.6.1	检测器 .....	187
5.6.2	混频器 .....	191
5.6.3	振荡器 .....	196
5.6.4	参量器件和可调相移器 .....	197
5.7	小结 .....	202
	致谢 .....	203
	参考文献 .....	203
<b>第6章</b>	<b>高温超导体/III-V 族固态器件的混合电路 .....</b>	<b>207</b>
6.1	引言 .....	207
6.2	器件特性 .....	208
6.3	混合放大器 .....	216
6.4	混合振荡器 .....	221

6.5	混合平衡混频器	222
6.6	混合接收机前端	224
6.7	小结	225
	致谢	226
	参考文献	226
<b>第7章</b>	<b>高 <math>Q</math> 值谐振器</b>	<b>228</b>
7.1	引言	228
7.2	理论	229
7.2.1	电磁场分析与谐振频率	230
7.2.2	$Q$ 值	232
7.2.3	最大电流密度和循环功率	234
7.3	实验装置和实验结果	235
7.4	高 $Q$ $TE_{011}$ 模式的灵敏度	240
7.5	其他高 $Q$ 谐振器	242
7.6	应用	245
7.6.1	滤波器单元	246
7.6.2	低噪声振荡器	247
7.6.3	高温超导体薄膜的微波特性测量	249
7.7	小结	254
附录	7A	255
	致谢	257
	参考文献	257
<b>第8章</b>	<b>封装</b>	<b>259</b>
8.1	引言	259
8.2	相互连接	260
8.2.1	在高温超导体上的金属化	260
8.2.2	相互连接的不同类型	263
8.3	封装材料	265
8.4	封装结构	270
8.5	小结	274
	致谢	275

参考文献 .....	276
<b>第9章 展望 .....</b>	<b>277</b>
9.1 极端主义者错了 .....	277
9.2 有选择的应用 .....	278
9.3 适当的市场 .....	280
9.4 关键和里程碑 .....	283
参考文献 .....	284
英汉名词术语对照 .....	285

# 第 1 章 引 论

## 1.1 历 史

超导电性是由荷兰物理学家 Heike Kamerlingh Onnes 在 1911 年发现的<sup>[1]</sup>。他发现的第一种超导体是汞(Hg)。当他将提纯的汞冷却到液氮温度 4.2K 时,电阻突然降至零,如图 1.1 所示。在此温度以下汞就成为超导体。此温度称为临界温度。自此以后直至 1986 年,虽然有许多金属、合金和一些化合物材料被发现是超导体,但  $T_C$  的升高是很慢的。事实上,直到 1986 年初,就在发现

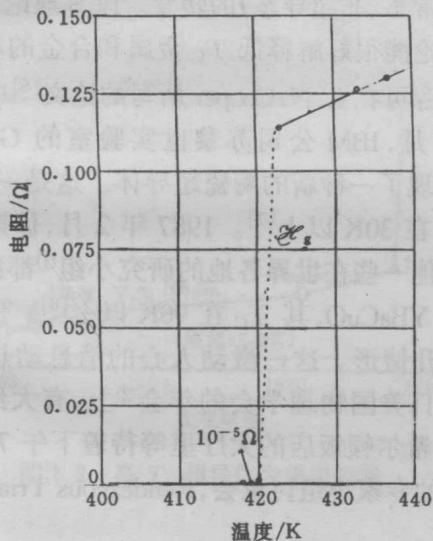


图 1.1 H. K. Onnes 测到的汞在低温下的电阻, 显示了超导状态的转变<sup>[3]</sup>

一种新的超导体之前,  $T_C$  的最高纪录还只是  $Nb_3Ge$  的  $23.4K$ <sup>[2]</sup>。对于实际应用来说, 由于所有这些低温超导体都必须工作在近于液氮温度, 这就限制了它的应用。

早期超导工作的历史可以在文献[3]和[4]中找到。在超导被发现之后, 许多物理学家企图建立解释这一现象的理论。这种努力延续了大约半个世纪, 1957年, J. Bardeen, L. N. Cooper 和 J. L. Schrieffer 发表了大家熟知的 BCS 理论<sup>[5]</sup>。BCS 理论是以量子力学为基础的。超导体中携带电荷的载流子是库珀(Cooper)电子对, 这是由自旋相反且被长程相互作用联系在一起的两个电子组成的, 在超导状态下, 所有库珀电子对是作为一种具有单动量的群体出现的, 这就是熟知的宏观量子态。因为电阻来自载流子的散射, 超导态中的所有载流子具有相同的动量, 这就解释了零电阻现象。库珀电子对的能量界限称为能隙, 它是温度的函数。在临界温度时能隙消失, 引起库珀电子对的解体, 这样就解释了在  $T_C$  下由超导态向正常态(非超导态)的转变。BCS 理论已经为许多实验所证实。该理论能很好解释低  $T_C$  金属和合金的超导行为。关于 BCS 理论的渊源可在 L. N. Cooper 所写的论文<sup>[6]</sup>中找到。

1986年1月, IBM公司苏黎世实验室的 George Bednorz 和 Alex Müller 发现了一种新的陶瓷超导体。这是一种钡、镧和铜的氧化物, 其  $T_C$  在  $30K$  以上<sup>[7]</sup>。1987年2月, 休斯顿大学的朱经武小组以及其他一些在世界各地的研究小组<sup>①</sup>都独立地发现了一种新的超导体  $YBaCuO$ , 其  $T_C$  在  $90K$  以上<sup>[8]</sup>。图 1.2 表示出了这种  $T_C$  的跃升情形。这一激动人心的消息动员了整个物理学界, 在 3月18日美国物理学会的年会<sup>②</sup>上, 有大约上千名物理学家聚集在纽约希尔顿饭店的大厅里等待着下午 7:30 开始的关于高  $T_C$  超导体的专家小组讨论会, Rendezvous Trianon 大厅的 1140

① 1987年2月24日中国科学院物理所宣布制成中点超导转变温度为  $92.8K$  的  $YBaCuO$  氧化物超导体(见赵忠贤、陈立泉等, 科学通报, 1987; 32: 412)。——校注

② 赵忠贤、陈立泉应邀出席了本次会议。——校注

个座位,在大门打开后的几分钟内被全部占满,上百位物理学家站在走廊里几个小时,耐心地听着一个接一个的 5min 报告,还有许多人到场外的休息大厅里收看电视屏幕上的现场直播,讨论会在凌晨 3:15 结束,但是还有许多人留在那里直到早上 6:00 才离开。这次轰动全世界的会议被称为“物理学界的伍茨塔”<sup>①</sup> (Physics Today, 1987.4)。自此以后若干种新的超导体又被发现,其临界温度更高,诸如铈族元素的化合物的最高  $T_C$  可达 125K<sup>[9]</sup>,汞的化合物的最高  $T_C$  可达 150K<sup>[10]</sup>。高温超导体最根本的特点是它的临界温度超过液氮温度(77K)。因这一突破大大降低了其所要

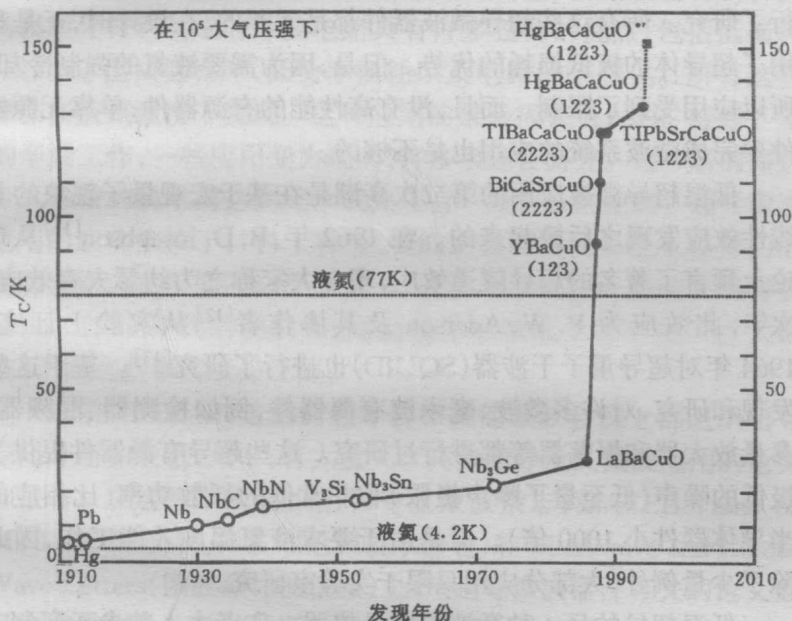


图 1.2 高  $T_C$  超导体发现史简图

① “伍茨塔”是 Woodstock 的音译,意为“盛况空前的集会”。来源于 1969 年 4 月在美国纽约州 Bathon 举行的一次音乐艺术节,称为 Woodstock Music and Art Fair,历时 4 天,有 4 万余人参加,盛况空前。



求的制冷设备的重量、体积及费用,以致使许多应用都更加切实可行。

## 1.2 低温超导

低温超导(LTS)的微波应用始于 50 年代。自此以后,超导微波谐振腔已为许多位研究者研究过。在对获得光滑超导表面所必需的处理技术进行详细研究之后,得到了低的表面电阻,铅和铌(Nb)的微波谐振腔在液氮温度下获得了非常高的  $Q$  值( $10^{10} \sim 10^{11}$ <sup>①</sup>)。对超导延迟线、慢波结构和其他基于传输线的器件都进行了研究。所有这些超导微波器件都是无源的,在设计时,正是利用了超导体的极低损耗的优势。但是,因为需要液氮的强制冷却,所以应用受到了限制。而且,没有高性能的有源器件,单靠无源器件要完成微波系统的应用也是不够的。

低温超导微波应用的第二次高潮是在基于宏观量子现象的非线性效应发现之后掀起来的。在 1962 年, B. D. Josephson<sup>[11]</sup> 从理论上预言了著名的超导隧道效应,现在大家称之为约瑟夫森效应。次年,此效应为 P. W. Anderson 及其协作者<sup>[12]</sup> 从实验上证实。1964 年对超导量子干涉器(SQUID)也进行了研究<sup>[13]</sup>。基于这些发现和研究,对许多微波、毫米波有源器件,例如检测器、混频器、参量放大器和振荡器等都进行过研究。这些超导有源器件提供了极低的噪声(低至量子噪声极限)和非常低的耗散功率(比相应的半导体器件小 1000 倍)。但是由于要求液氮温度才能工作,因此除了少量例外,大部分应用只限于实验室研究。

低温超导的另一种微波应用是仪器。作者本人曾参与研制一种超导取样示波器/时域反射计(TDR)/时域传输计(TDT),即 HYPRES PSP-1000<sup>[14,15]</sup>, 它是以铌的约瑟夫森结技术为基础的,工作在 4.2K。此仪器于 1987 年推出,具有直流至 70GHz 的带

①  $10^{11}$  的  $Q$  值在低于 1.3K 的温度下测得。——校注