

## 高温超导薄膜无源微波器件的应用\*

李 林

(中国科学院物理研究所 国家超导重点实验室 北京 100080)

**摘 要** 高温超导薄膜在微波器件中的应用,与常规导体相比可以减小器件的体积、重量、功率消耗和插入损耗,并且可以在液氮沸点附近工作,接近于卫星的环境温度 100K。微波器件是在几个平方厘米的高温超导薄膜上制备的。这些薄膜必须要有最高的超导性能,如临界温度、临界电流密度以及微波表面电阻。因此高温超导薄膜的应用受到制备大面积、高质量薄膜的限制。美国高温超导空间实验在 1999 年 5 月已经获得成功,使高温超导薄膜在微波器件中的应用成为现实。

**关键词** 高温超导,薄膜,微波元件

## APPLICATION OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING THIN FILMS IN PASSIVE MICROWAVE DEVICES

LI Lin(Lin Li)

(Institute of Physics, National Laboratory of Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The application of superconducting thin films in microwave devices allows a reduction in size, power consumption and insertion loss. High temperature superconductor devices can operate around the boiling point of liquid nitrogen, and not too far below the ambient in a satellite, which is about 100K. Microwave devices are fabricated from the thin films with dimensions of a few square centimeters. These films should give the optimum performance with the highest critical temperature, critical current density and microwave surface resistance. However, the general application of high temperature superconducting thin films has been inhibited by the difficulty of producing large area films with adequate properties. The High Temperature Superconductor Space Experiment in May of 1999 successfully demonstrated the application of high temperature superconductor microwave devices.

**Key words** high temperature superconductivity, thin films, microwave devices

## 1 引言

薄膜是高温铜氧化物超导体(HTS)质量最好的样品,因而无源微波器件已成为 HTS 薄膜的第一个应用对象。微波通信方面有不少应用超导体的机会,例如一个典型的微波接收机前端包括有天线、混频器、本机振荡器、相移位器、滤波器等(见图 1)<sup>[1]</sup>。这些器件都可用 HTS 薄膜来实现。

当今世界,每一种新技术出现后,往往首先用于军事装备,使其性能大大提高。通信卫星采用 HTS 薄膜制备的微波器件不仅可以提高性能并能减少体积、重量和功率损耗,在雷达和其他航空电子学中的

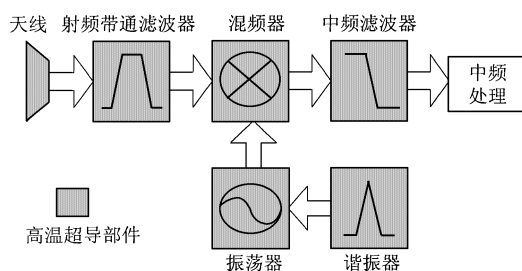


图1 微波接收机前端示意图

应用也是各国军事部门关注的一个热点。美国高温超导空间实验(HTSSE) I 和 II 分别起始于 1988 年和

\* 国家自然科学基金重点基金(批准号:59832050)资助项目  
2001 - 02 - 14 收到

1991年<sup>[2]</sup>.这是一项非常庞大的高技术研究,以美国海军实验室(NRL)牵头,协作单位有几十家有名的公司、科研单位及学校,从1988年开始对于设定的HTS微波器件、制冷机进行了地面、空间搭载实验,对于抗辐照性能进行长期考验.HTSSE-I从1989年开始设计制造HTS微波器件,如滤波器、谐振器、延迟线、天线等.当时并不是一件容易的工作,如衬底介电常数的一致性、HTS薄膜的稳定性、化学惰性等等都还不容易达到要求.从1989年开始到1995年,原本准备进行HTSSE-I搭载15个HTS微波器件的空间实验,但由于卫星的发射未到达轨道就失败,只进行了地面试验.HTSSE-I的地面实验显示了HTS器件在总体上比常规器件有很大的优越性,可以减少通信卫星的体积和重量.在这基础上又进行了HTSSE-II试验.在HTSSE-II中设计了更复杂的滤波器和开关结构,其中的HTS器件技术成熟程度已远超过实验室阶段.1999年5月,该卫星发射成功,HTSSE-II被送入空间轨道,并周期性地监测器件的电信参数,现已进行了HTSSE-III实验,发展的趋势是卫星上的全部器件由HTS薄膜无源微波器件替代,可以大幅度地减轻重量,即使使用微型制冷机,增加的重量与常规导体相比还可以减轻约29%的有效负载,消耗的电能估计只有360W(直流),并由此可以带动一系列民用移动通信产品.

## 2 高温超导薄膜

铜氧化物高温超导体有:钇(Y)系、铋(Bi)系、铊(Tl)系及汞(Hg)系.在这些超导体系中都分别有好几个相,它们的超导临界转变温度 $T_{co}$ 可分为几档:钇钡铜氧(YBCO)  $\cong 90\text{K}$ ;铋锶钙铜氧(BSCCO)  $\cong 110\text{K}$ ;铊钡钙铜氧(TBCCO)  $\cong 125\text{K}$ ;汞钡钙铜氧(HBCCO)  $\cong 135\text{K}^{[3-6]}$ .在HTSSE-I及II试验中,既采用了Y系薄膜器件,也采用了Tl系薄膜器件.Y系薄膜研究得最多,技术最成熟,它的 $T_{co}$ 最高可达93K,临界电流密度 $J_c(77\text{K})$ 最高达 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ ,制备的微波器件可在77K下运行. $\text{Pb}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ( $\text{Pb}-2212$ )薄膜最高的 $T_{co}$ 可达107K, $J_c(77\text{K})$ 达

$7 \times 10^6 \text{ A/cm}^{2[7]}$ ,制备的器件可在82K下运行. $\text{Pb}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ( $\text{Pb}-2223$ )薄膜 $T_{co}$ 可达125K, $J_c(77\text{K})$ 达 $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^{2[8]}$ ,制备的器件可在100K下运行. $\text{PbBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ ( $\text{Pb}-1223$ )薄膜的 $T_{co}$ 达121K,并可承受较大的临界电流密度.但是制备高质量的 $\text{Pb}-1223$ 并不容易,必须用Pb部分替代Pb,形成 $\text{Pb}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ 薄膜<sup>[9]</sup>.

到目前为止,国际上已开发了多种HTS微波器件,主要采用YBCO及 $\text{Pb}-2212$ , $\text{Pb}-2223$ 高温超导薄膜.若将使用温度提高到100K,薄膜的 $T_{co}$ 必须 $\geq 110\text{K}$ ,因此有必要研制 $T_{co} \geq 125\text{K}$ 的薄膜.与YBCO薄膜相比,用TBCCO薄膜制作微波器件具有如下优点:

- (1) TBCCO薄膜具有高的结构稳定性,对潮湿环境的抵抗力较强,性能一般不易退化;
- (2) TBCCO薄膜微波表面电阻明显低于YBCO,故品质因子大大提高;
- (3) TBCCO薄膜的工作温度可高达100K,而YBCO为77K;
- (4) TBCCO薄膜滤波器的功率使用容量明显优于YBCO薄膜滤波器,可达100W以上.

Tl膜的制备一般采用先沉积非晶前驱物,再用高温后退火Tl化将薄膜转化为超导相.许多薄膜制备设备,如磁控溅射、脉冲激光沉积等均被用于生长前驱物薄膜,Tl化工艺过程更加重要,尤其是大面积双面薄膜须要结构与厚度非常均匀的单晶,因此它的制备工艺要比外延YBCO单晶薄膜困难得多.

从以上的 $T_{co}$ 值来看,用这些薄膜制备的微波器件都需要配备低温制冷机.在欧美已具备有经过长期考验适用于空间的高效率小型低温制冷机,而卫星的阴面环境温度约100K,也可运用辐射制冷解决HTS超导薄膜微波器件的制冷问题,大大减低耗电费用.我国的低温技术本来是有基础的,但是由于不够重视及资金不足,现在与国际水平相比处于落后状态,不能满足空间使用的要求.

归纳起来HST薄膜的性能列于表1.表2给出了同样条件下典型HTS器件与常规导体铜器件品

表1 HTS薄膜的性能

薄膜材料	相纯度	取向	$T_{co}/\text{K}$	$J_c(77\text{K})$ $/ (10^6 \text{ A/cm}^2)$	$R_s$ (77K, 10GHz)	$R_s/R_c$ (77K, 10GHz)
YBCO	纯	c轴	~90	2-4	~250 $\mu\Omega$	$1.7 \times 10^{-2}$
Pb-2212	纯	c轴	107-110	1-7	~130 $\mu\Omega$	$9.0 \times 10^{-3}$
Pb-2223	2223及少量2212	c轴为主	110-125	$\geq 1$	~86 $\mu\Omega$	$5.7 \times 10^{-3}$

表 2 典型 HST 薄膜微波谐振器特性

薄膜材料	结构	工作温度/ K	$f_0$ / GHz	Q	$Q/Q_c$
YBCO	微带线	80	5	5900	25
TBCCO	微带线	80	5	11800	50

质因子  $Q$  之比,从  $Q/Q_c$  中看到, HST 器件的  $Q$  值比常规导体器件高出几十倍。

### 3 衬底材料

薄膜的最佳性能要求是外延的“单晶”结构,表面光滑无颗粒,  $c$  轴垂直于膜面。衬底是生长薄膜的模板,因此它们的选择极其重要,要求衬底与薄膜的晶格常数匹配,具有足够的机械强度和化学稳定性,以及有良好的微波性能。表 3 列出了微波性能好的衬底。从表 3 可以看出,蓝宝石 ( $\gamma$ - $Al_2O_3$ ) 衬底的微波性能最理想,而且物美价廉的大面积单晶材料已经工业化生产,但作为 HTS 薄膜的衬底需要在其表面制备一薄层  $CeO_2$  阻挡层,防止铝向 HTS 薄膜扩散形成电镀层,损害薄膜的超导性能<sup>[10]</sup>。第二种微性质良好的衬底为  $MgO$ ,它的单晶材料价格也便宜,但是  $MgO$  在空气中容易潮解,并且与 HTS 的晶格常数相差比较大,若转  $45^\circ$ ,则 HTS 可以在  $MgO$  上外延生长。目前,在 HTS 微波器件中较常用的衬底为  $LaAlO_3$ ,其微波性能居中。 $LaAlO_3$  晶体在  $500^\circ C$  左右发生结构相变,由于在薄膜制备过程中必须反复经过  $500^\circ C$ ,因此必然产生大量孪晶(畴界),使表面变得粗糙,这是它的缺点。经过人们的不断探索,开发出了性能与  $LaAlO_3$  相近的新衬底材料  $(LaAlO_3)_{0.3} - (Sr_2AlTaO_6)_{0.7}$ ,简称 LASAT。对于这种衬底上生长的 HTS 薄膜研究还不多。另外就是  $NdGaO_3$  衬底,现在国内尚没有,价格比较贵,但是外延生长 HTS 薄膜的效果比较好。

表 3 几种常用基片的微波性质

材 料	晶格常数 / nm	介电常数	$\tan \delta \times 10^{-5}$	$f$ GHz	$T$ K
$\gamma - Al_2O_3$	$a = 0.4758$	$\epsilon_{ab} = 11.5$	20	9	300
	$c = 1.299$	$\epsilon_c = 9.4$	0.15		77
$LaAlO_3$	$a = 0.3788$	24—25	30	10	300
			0.76	10	77
			0.30	10	10
$MgO$	$a = 0.42$	9.5—10	0.6—910	10	4.2—300
LASAT	$a = 0.5468$	22.5	$\leq 100$	9.3—10	300
	$c = 0.7729$				
$NdGaO_3$	$a = 0.545$	20—25	40—70	10	10—300
	$b = 0.549$				
	$c = 7.73$				

### 4 HTS 薄膜微波表面电阻

超导体在高频交变电磁场下与直流电下不同,是有电阻的。在超导体中通以直流电,超导电子会毫无阻力地通过超导体,电场等于零。但当电流反向时,超导电子的运动方向要改变,而超导电子是有惯性的,必须有外力才能改变它的运动方向。在高频率下,超导电子要不断地改变方向,因而在超导体内存在交变电场。由于电场的存在,会使正常电子运动,从而产生损耗,但是只有频率超过  $10^6$  Hz 以上,才能观察到损耗现象。在这样高的频率下,普通导体存在集肤效应,即高频电磁场只穿透导体的表面。同样也只穿透超导体的表面,因而称为表面电阻  $R_s$ 。 $R_s$  的测量最通常用的方法是以微波谐振器  $Q$  值为基础,将圆筒型铜谐振器的一端盖板换成待测超导体样品,测量铜端盖板及超导体端盖板的  $Q$  值,求它们之间的差,可推算出超导样品的  $R_s$ ,它的示意图图 2。

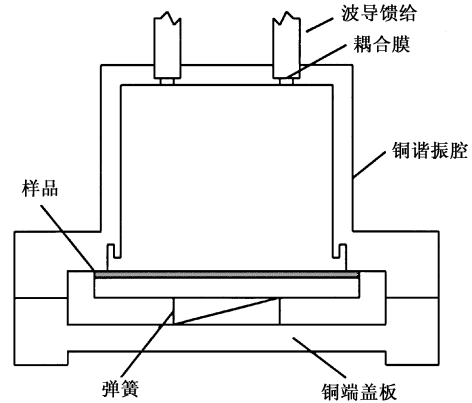


图 2 谐振器的一端盖板用超导样品替换示意图

若要研究新的薄膜样品  $R_s$  可用上述方法的变种,即将  $10 \times 10$  mm 大小的样品放在盖板的中央,虽然灵敏度要差一些,但是可以用较低的频率(30—40 GHz)来测量,谐振器用  $TE_{011}$  模式工作,测量过程要简单得多。

#### 4.1 介电谐振器

这种器件原本是为测量高  $Q$  值振荡器中的介电材料的损耗,后来也用于测量表面电阻。图 3 是介电谐振器示意图。测量时将两片超导薄膜样品用弹簧夹紧在介电质圆柱或圆盘上,膜面相对,保证样品要盖住圆盘的整个面积。然后放入一个传导性能好的盒子里,以减少辐射损失。将微波能量耦合到谐振

器中,  $R_s$  的测量结果由  $Q$  值得到. 这种方法不需要预先校准正常导体盖板的  $Q$  值, 因而节省了测量的时间.

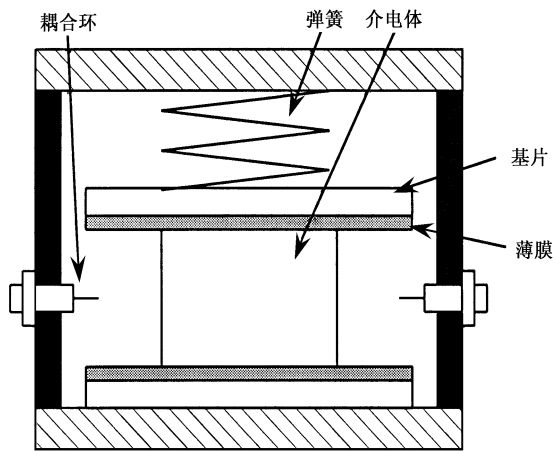


图3 介电谐振器示意图

#### 4.2 平行板测量法

这种方法本来是为测量微波衬底的介电常数的, 现用来测量超导样品的  $R_s$  也适合. 测量时将两片超导样品相对放置, 中间夹一薄层介电质片, 构成平行板谐振器, 如图4所示. 谐振器固定在黄铜的腔体内, 顶端带有微带线的两个半刚性同轴线靠近平行板, 作为耦合外电路之间的输入和输出. 谐振器的无载  $Q$  可由下式给出:

$$Q_v^{-1} = \tan \delta + \alpha S + (\beta R_s / S),$$

式中  $S$  是介电隔离层的厚度,  $Q_v$  是整个共振器的  $Q$  值,  $\alpha$  和  $\beta$  是腔的几何形状与频率的函数. 为了测量准确, 需要尽量减小  $\alpha S$ , 为此需要选择极薄和介电损耗极小的隔离层, 由此可以加大超导体的贡献. 函数  $\beta$  可直接由谐振器在 TE 模式下激发获得.

测量微波表面电阻的方法很多, 各有优缺点, 现

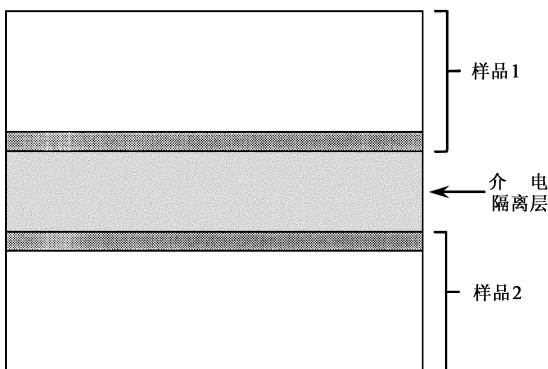


图4 平行板的截面示意图

表4 微波表面电阻测量方法

测量系统	频率范围 / GHz	分辨率 / mΩ	评语
替代腔的一端盖板	20—110	2	$R_s$ 的测量较为准确, 需要部分校准
部分替代腔的一端盖板	10—100	2	$R_s$ 测量比上述方法灵敏度较差, 但可测量 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 大小的样品
介电谐振器	5—30	0.01	需要准确几何形状的介电质圆盘, 被辐射和介电损耗所限制
平行板	4—12	0.01	需要合适的介电隔离层, $R_s$ 的计算简单
腔微扰	1—10	0.3	需要常规超导体谐振器, 计算 $R_s$ 复杂, 价格昂贵
共焦谐振器	>30	0.3	可以划出 $R_s$ 的空间分布, 只限于高频率下应用
动力传递	>10	N/A	只能用于薄样品, 设备有大的动态范围, 误差 $\sim \pm 30\%$

将几种常用的方法列入表4.

超导薄膜的表面电阻测量是微波应用的最关键的测量之一, 它的测量结果应该是薄膜整个表面的平均数. 表面电阻受薄膜表面的非超导颗粒影响极大<sup>[11]</sup>,  $c$  轴 YBCO 薄膜若没有颗粒存在, 计算出来的  $R_s$  可低于  $70\mu\Omega$  (77K, 10GHz) 及  $4\mu\Omega$  (4K, 10GHz)<sup>[12]</sup>. 因此, 为了微波器件的应用, 寻找最佳的制备薄膜工艺是至关重要的.

### 5 HTS 薄膜微波器件

薄膜微波器件是建立在平面微带基础上的. 作为例子, 下面我们介绍几个重要的器件.

#### 5.1 延迟线

用直径 50mm 的  $\text{LaAlO}_3$  衬底生长的  $\text{Ti} - 2212$  薄膜制成微带延迟线(见图5<sup>[13]</sup>), 其结构为: 线长 640mm, 径迹宽度  $210\mu\text{m}$ , 间隔 1.5mm. 测量这器件的结果显示, 在 6GHz 带宽和 9ns 延迟时, 它的插入损耗在 77K 时只有 3dB.

#### 5.2 集成的混频器和天线

用一片  $\text{MgO}$  衬底在上面生长  $\text{Bi} - 2223$  薄膜, 制备出 4 个一组的的天线 - 混频器, 见图6. 运用 26GHz 的射频信号和分谐波 12GHz 的本机振荡器, 记录下来的信号噪声为 60dB, 转换增益为 -38dB, 在其他复合分谐波中也观察到了这种混合现象.

#### 5.3 谐振器

HTS 谐振器的形状一般是微带线, 由于它们有低的表面电阻, 因此  $Q$  值可以达几千, 而冷却的铜或银只有几百. 如在  $\text{MgO}$  衬底上制成的曲折线谐振

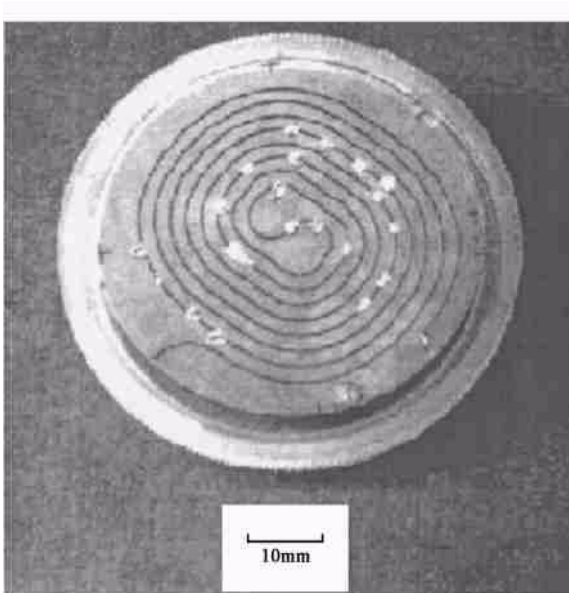


图5 在  $\text{LaAlO}_3$  衬底上生长的  $\pi$ -2212 薄膜光刻的延迟线图案

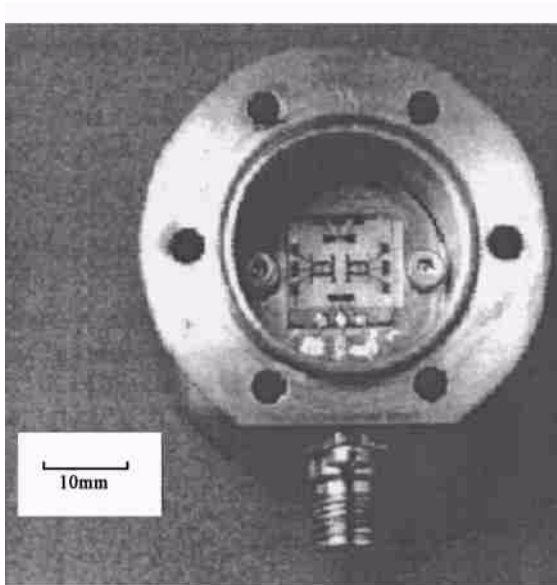


图6 在一片衬底上集成的一组天线 - 混频器

器<sup>[14]</sup>及在  $\text{LaAlO}_3$  衬底上制成的低频率(1.4GHz)谐振器,以及在一个微波振荡器内作为稳定元件的高频率、直线谐振器,都有这样的现象。

#### 5.4 滤波器

上述器件是微波线路中的个别组件.要在一片衬底上制造整个微波接收机的前端(见图1),需要增加更多的滤波器.滤波器主要是一系列耦合的谐振器,能在一个确定的频率范围内传输信号.如在双面抛光  $\pi$ -2223/ $\text{MgO}$  上光刻成型的平面边缘耦合微带滤波器<sup>[15]</sup>,可以在中间频率为 6.3GHz、带宽为 1%的条件下工作.它的最小通带插入损耗只有 1.2dB,比相同的铜滤波器 10dB 要小许多。

#### 5.5 振荡器

振荡器是微波子系统的部件,是一种类型的谐振器,用来确定工作的频率和稳定振荡器.图7是一个 HTS 微带谐振器稳定的振荡器,它们的组成是结合在同一衬底上的 1 个反馈结构和 2 个 GaAs MMIC 放大器,该振荡器在 77K 下运行,中间频率为 3.1GHz<sup>[16]</sup>.照像显示了工作器件和 HTS 谐振器的位置.谐振器是用  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$   $\text{LaAlO}_3$  衬底生长的  $\pi$ -2212 薄膜制造的,它输出(77K)的相位噪声在 1.3GHz 频率下测量为 -61dB/Hz,偏移为 10kHz。

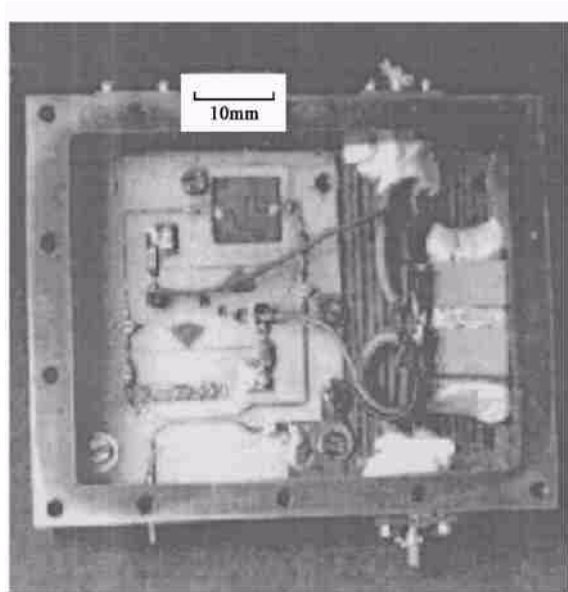


图7 一个 HTS 微带谐振器稳定的振荡器

## 6 结束语

高温薄膜无源微波器件的应用已成为现实.西方发达国家的政府部门与工业界都给予了很大的重视,投入了较大的力量进行研究与开发.特别是在移动通信方面,经过多年的研究,现已进入现场实验.由美国海军实验室牵头的高温超导空间实验计划 (HTSSE) 可算是政府与军事部门组织的研究项目中的一个典型代表,通信卫星已于 1999 年 5 月进入轨道,经过一年多的运行,载有的 8 个高温超导微波器件取得了很多的数据,高温微波器件在空间的应用已经获得成功.但是我国在这方面还没有给予重视,目前只有中国科学院个别研究所和大学的系,自发地进行着点点滴滴的研究工作.研究目标不够清楚,资金不足.本来高温超导微波元件的研究与载人飞船比并不是一个庞大的项目,使用的资金也并不多,

物理

但是它的效益确实惊人.特别是海湾战争以来,高温超导微波器件及其子系统在军事上的应用研究,已经走出实验室进入实用武器阶段.国防科工委应当立即组织力量将此项目列入“十五”规划,开展高温超导微波电子学及子系统在国防中的应用研究及应用基础研究,迎头赶上西方发达国家,保证国家的安全.

致谢 对陈芳允院士生前给我的信任和委托深致谢忱.对 D. Dew - Hughes 教授所供给的资料和彭炜同学对本文制图的帮助一并感谢.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Dew Hughes D. Microwave Physics and Technique. Netherlands : Kluwer Academic Publishers ,1997 .83 —114
- [ 2 ] Lichtenberg C L, Price G E, Nisenoff M. AIAA-96-1058-CP, 576
- [ 3 ] Wu M K, Ahburn J R, Toring C T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987, 58 :908
- [ 4 ] Mæda H, Takano Y, Fukutomi M *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,1990, 27 :L209
- [ 5 ] Sheng Z Z, Herman A M. Nature ,1988 ,332 :138
- [ 6 ] Putilin S N, Antipov E V, Chmaissen O *et al.* Nature ,1993 ,362 :226
- [ 7 ] Holstein W L, Parisi L A, Wilker C *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1992, 60 :2014
- [ 8 ] Hollmann E K, Vendik O G, Zaitsev A G *et al.* Superconductor Sci. Technol. ,1994, 7 :609
- [ 9 ] Kale S K *et al.* TBCCO thin films and passive microwave devices. In: Balachandran U, McGinn P J, Abell J S( eds. ) . High Temperature Superconductors Synthesis, Processing and Large Scale Appli-

cations. Pa: The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, 1996. 345 —354

- [ 10 ] Wang F, Wardenweber R. Thin Solid Films ,1993 ,227 :200
- [ 11 ] Tian Y J, Lu H B, Xu S F *et al.* Physica C, 1994 ,220 :114
- [ 12 ] Tian Y J, Li L, Guo L P *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1994 ,65 :2356
- [ 13 ] Dew Hughes D, Jenkins A P. In: Blank D H ( ed. ) . Proc. 2nd. Workshop on HTS Applications and New Materials. University of Twente : Enschede ,1995 ,34
- [ 14 ] Morley S M, Jenkins A P, Su L Y *et al.* IEEE Tran. Appl. Superconductivity ,1993 ,3 :1753
- [ 15 ] Jenkins A P *et al.* Applied Superconductivity, Bristol : IOP Publishing, 1995. 1187 —1190
- [ 16 ] Klieber R. IEEE Microwave and Guided Lett. ,1992, 2 :22



### 作者简介

李林,女,1923年10月出生.1951年回国,曾在中国科学院冶金研究所、原子能研究所、高能物理研究所、物理研究所任副研究员、研究员.1980年当选为中国科学院院士.50年代在中国科学院冶金研究所研究球墨铸铁及包头铁矿.1958年开始在原子能研究所为核生产堆、核潜艇堆等的材料从事了13年的研究,参与解决材料国产化问题.1973年开始,先在中国科学院高能物理研究所从事高能加速器超导磁体的研究,后在中国科学院物理研究所从事超导薄膜研究,1986年至今开展高温超导薄膜研究.发表文章160余篇,培养研究生40余名.

## 封 面 说 明

以氮化镓为代表的 III 族氮化物材料是近十年来迅速发展起来的半导体材料.该材料具有许多优良特性,不仅适合制备可见光(特别是绿光、蓝光、紫光)半导体发光管和激光器、紫外探测器等光电子器件,而且适合制作耐高温、大功率、高频微电子器件.现在已制作出这些器件并且性能优良,其中一些还进入了市场,得到实用.封面所示的是由中国科学院半导体研究所研制的氮化镓基发光管.该所还和有关单位合作研制了氮化镓基材料的异质结场效应晶体管,其室温截止频率和工作温度分别达到 13kMΩ 和 300 °C.利用氮化镓基材料的其他特性的新器件尚待开发.利用氮化镓基器件将在显示、照明、印刷、光盘、海底搜索、紫外探测以及航空、航天、汽车、石油钻井、雷达、无线通信等方面得到广泛而重要的应用.

(中国科学院半导体研究所材料中心 孙殿照)