

第一讲 高温超导薄膜及微波器件应用

李 宏 成

(中国科学院物理研究所超导国家重点实验室,北京 100080)

摘要 介绍了高温超导薄膜制备方法(如磁控溅射、脉冲激光淀积、电子束共蒸发、化学气相沉积等)研究的进展和现状。对薄膜生长中的一些技术,如外延生长高质量的薄膜对基片的要求、常用的基片、为了减小像硅和蓝宝石一类的重要基片与高温超导薄膜间的扩散以及改善晶格匹配所采用的缓冲层技术等也作了简要的介绍。还介绍了薄膜的微波性质和用高温超导薄膜制备的微波无源器件。

关键词 高温超导薄膜,薄膜制备技术,薄膜微波性质,微波无源器件

1987年初,临界温度为92 K的钇钡铜氧化物超导体的发现使科学家的一个幻想——液氮温度(77K)超导体——变成了现实,它极大地鼓舞了科技界,吸引了大批科学家投入了高温超导体(HTSC)的研究。人们预计,在液氮温度下工作的HTSC电工设备和电子器件将会引起尖端科学技术的重大变革。有人甚至预言世界将会进入一个新的时代:在石器、铜器、铁器、钢与半导体时代之后将是超导时代。

薄膜是现代电子学器件的基石,在钇钡铜氧化物超导体(YBCO)发现后,大量的科学家立即投入HTSC薄膜以及电子器件的制备研究。人们很快就发现,要得到性能良好的HTSC薄膜,必须使薄膜具有正确的组分、正确的晶体结构以及正确的晶体取向,这是一个复杂而艰巨的任务。经过大量科学家们日以继夜的奋战,在短短的一二年时间内就取得了突破:高质量的YBCO外延薄膜零电阻温度 T_{c0} 达到92 K,77 K时临界电流密度 J_c (77 K)达到 10^6 A/cm²,超过块状样品几个数量级,能满足制备电子器件的需要;同时还证实了HTSC电子器件可以在液氮温度下工作,性能良好。到现在,一些HTSC器件已成为商品,使性能优越的超导器件脱离昂贵的液体氮而使用廉价的液体氮作为冷却剂。一系列HTSC微波器件正在准备进行太空检验。

本文将首先介绍HTSC薄膜的制备方法,

然后介绍它的微波性质,最后简要介绍一些典型的HTSC薄膜微波无源器件。

1 HTSC 薄膜制备方法

1.1 对制膜技术的要求

高温超导体是复杂的化合物,含有四至五种组元,组元之间比例严格一定,往往还存在几种晶体结构不同的物相。例如,Y-Ba-Cu-O体系,只有Y/Ba/Cu等于1/2/3,而且是正交结构,氧含量超过6.8时, T_{c0} 才能达到90 K以上。在BiSrCaCuO体系中,只有Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀的 T_{c0} 才为110 K,而TlBaCaCuO体系中,Tl₂Ba₂CaCu₂O₈与Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀的 T_{c0} 超过90 K(分别为95 K与125 K)。要获得性能良好的HTSC薄膜,首先必须使组分正确,再使晶体结构正确。组分问题要在薄膜淀积过程中加以解决,而晶格结构则需在高温下淀积薄膜(称为原位热处理),或在淀积之后进行高温处理(称为后热处理)来解决。所需的高温在600—900℃之间,与薄膜种类和淀积方法有关。

HTSC是氧化物,必须在氧气气氛中才能形成,氧的分压在 10^{-2} Pa以上。高氧压与高温对镀膜设备是很有害的,它使高温下工作的部件(如灯丝与发热元件)迅速损坏。

HTSC属于层状结构,具有高度各向异

性.沿 c 轴方向的临界电流密度比 ab 平面内要小 10 倍到 100 倍.这就需要将 HTSC 制成具有确定晶轴取向的外延薄膜.为使薄膜晶轴定向生长,需要选用适当的单晶材料作为基片,其晶格结构要能与 HTSC 匹配.同时,HTSC 是化学性质活泼的物质,很容易与常用的基片材料发生反应或扩散,使超导性能变坏,所用基片材料必须与 HTSC 不发生化学反应或扩散,或反应与扩散不明显,不显著影响超导性.这两个要求大大限制了基片的种类,进一步增加了制备 HTSC 薄膜的难度.

制备 HTSC 薄膜常用的基片材料有 SrTiO_3 (STO), LaAlO_3 (LAO), 钇稳定的 ZrO_2 (YSZ) 和 MgO . STO 和 LAO 与 YBCO 晶格匹配相当好,扩散不显著,可以用来外延出很好的 YBCO 薄膜.对于 YSZ 和 MgO ,若直接按 YBCO 晶格生长,则失配度较大,但若 YBCO 晶格与它们的晶格成 45° 角则可达到较好的匹配,也可外延出很好的 YBCO 薄膜.STO 的介电常数很高 ($\epsilon > 300$),介质损耗大,不宜于在微波器件中使用. LAO 与 MgO 的介电常数适中(前者 ~ 20 , 后者 ~ 10),介质损耗也很小 ($\text{tg} \delta < 10^{-4}$, 77 K 下),适宜于在微波器件中使用. YSZ 介质损耗较大,但价格便宜,在我国使用较广泛. LAO 存在明显的孪晶,机械强度不够,是个缺点. MgO 容易潮解,也不理想,人们仍在不断地努力来寻找更好的适宜于 HTSC 薄膜生长的基片材料.

在半导体工艺中具有举足轻重地位的 Si 片,由于扩散问题,不能直接用来制备 HTSC 薄膜.微波性质良好的蓝宝石由于同样原因也不能直接作为 HTSC 的基片.

1.2 HTSC 薄膜制备方法

1.2.1 磁控溅射法

在 Ar 气中进行辉光放电, Ar 离子打到处于负电位的靶材上,将动能转移给固体原子,使其脱离固体,淀积在基片上形成薄膜.在靶的表面加上一定形状的磁体,磁场将电子约束在靶附近,增加与气体的碰撞几率,增加 Ar 离子数量,从而大大提高淀积率.这就是磁控溅

射法.这种方法已广泛地被用来制备薄膜.为了提供 HTSC 所需的各种元素,可采用多靶同时溅射.在一定条件下,采用单一的化合物靶也可得到所需化学配比的薄膜,这样,设备更简单,控制也容易.在制备 HTSC 氧化物薄膜时,往往要加入适量的氧气,使薄膜充分氧化.系统内的负氧离子打到处于正电位的基片上产生反溅射,会改变已淀积薄膜的成分.为了克服反溅射,可以采用高压(10—100 Pa)增加分子碰撞几率,使高能氧离子经碰撞变成低能的粒子落到基片上,此时不再产生反溅射,从而可获得与靶的成分相同的薄膜.一个研究组采用 80 Pa 的 Ar 与 O_2 混合气 ($\text{Ar}/\text{O}_2 = 2$),用 $\phi 40$ mm 的化合物平面靶,在无规取向的 Al_2O_3 片上制备的 YBCO T_{c0} 达到 83 K; 在 (100) SrTiO_3 单晶片上原位制备^[1]出 YBCO 外延薄膜, T_{c0} 为 89 K, 77 K 零磁场的 $J_c(77\text{K}) = 1.3 \times 10^6 \text{A}/\text{cm}^2$. 在这个工艺中,基片位于靶的轴线上,与靶平面平行,称为在轴溅射.另一个小组采用较低的气压(4.2 Pa),但用 $\phi 20$ cm 的靶,仍用在轴溅射,在 $\phi 5$ cm 的 (100) LaAlO_3 单晶片上制备了均匀的 YBCO 外延薄膜, $T_{c0} = 88 \text{K}$, $J_c(77\text{K}) = 2.8 \times 10^6 \text{A}/\text{cm}^2$. 在此工艺中,靶上的溅射刻蚀环内径大于基片直径,基片已脱离反溅射严重的区域,也可获得组分正确的高质量薄膜.

另一个克服反溅射的途径是将基片远离靶的轴,脱离靶的溅射环下的反溅射区,称为离轴溅射.一个小组采用离轴溅射,并使基片与靶面垂直,在 (100) STO 片上制备了 YBCO 外延薄膜, $T_{c0} = 90 \text{K}$, $J_c(77\text{K}) = 1.4 \times 10^6 \text{A}/\text{cm}^2$, 所用气压为 26.6 Pa. 为了改善离轴溅射中基片不同部分与靶的距离不同而造成的厚度不均匀性,一个小组^[2]使基片旋转,用 $\phi 5$ cm 的小尺寸靶,在 $\phi 5$ cm 的大尺寸 LAO 片上制备了 YBCO 薄膜,厚度均匀度达到 $\pm 10\%$, 而 T_{c0} 则在 $91.1 \pm 0.5 \text{K}$ 范围内.

将靶做成圆环形,在圆环内表面产生辉光放电,基片放在圆环的轴线上,也可很好地克服反溅射.一个小组^[3]用这种方法在 STO, MgO

与 YSZ 片上制备了高质量的 YBCO 外延薄膜,其 $J_c(77K)$ 分别为 5.5, 0.9 与 $2 \times 10^6 A/cm^2$ 。

磁控溅射法制备 HTSC 薄膜工艺的重复性良好。一个小组报道,采用离轴磁控溅射,在 LAO 基片上外延的 c 轴取向的 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ 薄膜, $T_{c0} = 92.5K$, 转变宽度 $\Delta T = 0.57 K$, $J_c(77K) = 3.6 \times 10^6 A/cm^2$, 连续制备 15 次样品中,有 93% 的样品 $T_{c0} \geq 90K$ 。

1.2.2 脉冲激光淀积法

这是一种近几年才发展起来的制膜技术。高能脉冲激光可将固体表面原子蒸发出来,淀积在附近的基片上,形成薄膜。激光光束可在空气中传播,不受电场与磁场的影响,因而比电子束和离子束镀膜简单得多。自 1987 年激光淀积法开始应用于 HTSC 薄膜的制备以来,已取得很大进展,被许多实验室所采用。为了获得高平整度的 HTSC 薄膜,需要采用波长较短的准分子激光器或红外激光器的高次谐波光束。一个小组用 Nd:YAG 激光器的三次谐波 (355nm), 能量密度为 $3 J/cm^2$, 脉冲宽度为 8 ns, 以 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 化合物为靶材, 氧压为 26 Pa, 在 STO 单晶片上原位外延 YBCO 薄膜, $T_{c0} = 92-93K$, $J_c(77K)$ 高达 $6 \times 10^6 A/cm^2$ 。一个小组^[4]采用 KrF 准分子激光器, 波长为 248 nm, 能量为 $1.5 J/cm^2$, 脉冲宽度为 20 ns, 脉冲重复频率在 1—100 Hz 间变化时, YBCO 淀积率可在 0.1—14 nm/s 间变化,而 YBCO 的 T_{c0} 均在 90 K 以上,没有明显变化。在淀积率高于 7 nm/s 时,薄膜中含有少量的 a 轴取向晶粒, c 轴晶粒取向度略降低。高速淀积高质量的 HTSC 薄膜为规模性生产打下了良好的基础。淀积率高,是脉冲激光法的一个优点。

我们用激光束扫描,或使基片运动,或将二者结合,可在较大面积基片上制备均匀的 HTSC 薄膜。

导电材料与不导电材料均可用激光法制成薄膜,所需的靶材尺寸小,在同一设备中可安装多个不同材料的靶材,可同时制备多种薄膜或

多层膜。激光法的这种高度灵活性使它在探索新型薄膜材料和各种多层膜中发挥了巨大的作用。有人风趣地说,脉冲激光淀积法可把一块粘土制成高质量的薄膜。用激光法在 Si 片上外延一层 YSZ 薄膜,再外延 YBCO^[5], T_{c0} 达到 86—88 K, $J_c(77K)$ 达到 $2.2 \times 10^6 A/cm^2$ 。YSZ 层起阻挡层作用,防止 Si 与 YBCO 之间扩散,使得以 Si 为基片外延 YBCO 薄膜成功,为 HTSC 与半导体工艺结合打下了重要的基础。由于激光淀积法的优越性与广阔的发展前景,它已被越来越多的实验室所采用。

1.2.3 电子束共蒸发法:

用电子束加热使物质蒸发是传统的成熟的镀膜方法。HTSC 各组元蒸发温度相差很远,必须采用多源共蒸发方法来制备 HTSC 薄膜。多源方法可灵活地改变薄膜成分,但增加了设备造价与工艺复杂性。电子束的传输需要高真空,产生电子束的灯丝也需在高真空条件下工作。同时,要生成 HTSC 薄膜必须有足够的氧气。为了解决这一矛盾,通常在基片近旁通入氧气,造成局部空间氧分压高,满足 HTSC 生长的需要,其余部分仍维持足够的真空,使灯丝寿命不至于过短。在制备 YBCO 时, Ba 是很易氧化的金属,其氧化物覆盖在融化的 Ba 表面,妨碍 Ba 的蒸发,热量的积累造成突然爆发,使 Ba 蒸发不稳定。采用 BaF_2 作为 Ba 源可克服此问题。薄膜淀积后,需用 $O_2 + H_2O$ 气对薄膜进行热处理,使膜内 BaF_2 分解,并生成 YBCO 高温超导相。一个小组采用 Y, BaF_2 , Cu 三源电子束共蒸发法镀膜,然后在 $H_2O + O_2$ 气中 $900^\circ C$ 热处理 30 min, 再在纯 O_2 , $525^\circ C$ 的气氛中使四方相变成正交相的 YBCO 外延薄膜。 $T_{c0} = 90.0K$, $\Delta T_c = 0.5K$, $J_c(77K) = 1 \times 10^6 A/cm^2$ 。电子束镀膜中基片与蒸发源间距离大,可在较大面积上获得均匀的薄膜。采用后热处理工艺,可在基片的两面同时制备高质量的 YBCO 薄膜,是这种方法的重要的特点。双面 HTSC 薄膜对于某些微波器件说来是非常必要的。

1.2.4 化学气相沉积法 (CVD)

这是另一种应用很广泛的制膜方法。载气将含有所需元素的化合物蒸气带入反应室中,在高温下分解出所需元素,淀积在基片上形成薄膜。若通入活性气体,如氧、氮,则可生成化合物薄膜(氧化物、氮化物)。CVD法可在形状复杂的基片上镀膜,淀积率高,便于生产。CVD在半导体工艺中占有重要地位。将CVD法用来制备HTSC薄膜时,遇到了一个巨大困难:具有合适的蒸发温度的含Ba化合物是一种很稀有的价格昂贵的有机物。这一点使CVD制备HTSC薄膜法的发展受到了严重的阻碍,使它仅限于少数实验室。

CVD法的一个成功的例子是,用 β -二酮螯合物 $Y(C_{11}H_{19}O_2)_3$, $Ba(C_{11}H_{19}O_2)_2$, $Cu(C_{11}H_{19}O_2)_2$ 作为Y, Ba, Cu源, 666 Pa的Ar + N₂O作为载气与反应气体,在730℃的LAO上原位外延YBCO薄膜, $T_{c0} = 89K$, $J_c(77K) = 2.3 \times 10^6 A/cm^2$ 。另一个小组将上述三种化合物混合压成棒,使其缓缓进入300℃的炉内,三种有机物在棒端同时气化,被载气(He)与氧气带入反应室,制得YBCO外延薄膜, $T_{c0} = 85-91K$, $J_c(77K) = 4 \times 10^6 A/cm^2$ 。一旦有机Ba化合物能更方便地制取后,CVD制备HTSC薄膜技术将会得到更好的发展。

1.3 阻挡层技术

为了能在HTSC薄膜技术中利用Si与蓝宝石的特长,人们发展了阻挡层技术,以解决扩散与晶格匹配问题。在R-切割的蓝宝石片(R-Al₂O₃)上外延一层50 nm的STO,作为阻挡层,在其上外延YBCO^[6], T_{c0} 达到86.5K, $J_c(77K)$ 达到 $2 \times 10^6 A/cm^2$ 。这说明YBCO外延质量是很好的,更重要的是它的微波表面电阻 $R_s(10GHz, 10K) = 65\mu\Omega$,比没有阻挡层的小15.4倍。这一结果引起了人们很大的兴趣。在R-Al₂O₃上外延YSZ与CeO₂作为阻挡层也得到了很好的结果。这样就可用微波性能良好的蓝宝石来制备HTSC薄膜了,这对于微波应用是很重要的。

前面提到的在Si片上外延YSZ,再外延YBCO,获得高质量的YBCO^[5]薄膜,这是

HTSC与半导体技术相结合道路上迈出的重要的一步,受到了极大的重视。但是,YBCO的热膨胀系数是Si的3.6倍,当YBCO膜厚度超过50 nm时,YBCO上出现微裂纹,使 $J_c(77K)$ 降低一个数量级。Si与YBCO间热膨胀的匹配问题,是亟待解决的一个难题。

在柔性材料,如金属带或石英纤维一类的材料上制备HTSC薄膜是一个很有应用前景的课题。目前HTSC线材的 $J_c(77K)$ 仍然相当低,不能在电工设备中使用,而HTSC薄膜的 $J_c(77K)$ 已达到了实用的要求。若能在柔性材料上制备出同样质量的HTSC薄膜,将是一项重大的技术突破。柔性材料与HTSC间存在明显的扩散,必须加阻挡层才有可能制备出质量高的HTSC薄膜。在镍基合金带上制备YSZ,作为阻挡层,再制备YBCO薄膜, T_{c0} 达到87K, $J_c(77K)$ 达到 $3 \times 10^4 A/cm^2$,要使 $J_c(77K)$ 达到 $10^6 A/cm^2$ 还要解决一系列的技术问题,使YBCO薄膜具有高度的择优取向是必须要解决的关键问题。

2 HTSC薄膜的微波性质

超导体的电阻为零是针对直流电流而言的,而交流电流超导体是有电阻的。其原因在于,在传导交变电流时,超导电子运动方向不断地反向,需要有电场存在,这就引起正常电子运动,产生损耗,也就是说具有电阻。这种电阻是很小的,只有在频率高于 $10^8 Hz$ 以上时才是显著的。BCS理论指出,超导体的表面电阻(在高频下,由于集肤效应,只有表面电流) R_s 与频率 f 和温度 T 的关系为: $R_s \propto f^2 \exp(-\Delta_0/k_B T)$ 。式中 k_B 是玻耳兹曼常数, Δ_0 是超导能隙。此式给出 R_s 与 f 的平方成正比,随 T 的下降按指数规律下降。常规超导体的 R_s 符合此关系式。HTSC的 R_s 与 f^2 近似成正比,但温度关系与此式不同。

图1给出了YBCO薄膜在77K温度时 R_s 与频率 f 的关系。图中包括了Cu在77K的数据和Nb在7.7K的数据。YBCO薄膜的

数据取自各个实验室的最好结果。 R_s 对样品结构和表面状况非常敏感, 样品质量不同时, R_s 可以相差两个数量级以上。只有外延很好的 c 取向薄膜(或单晶)在表面很平整、很干净的环境下, 才具有图 1 所给出的性能。

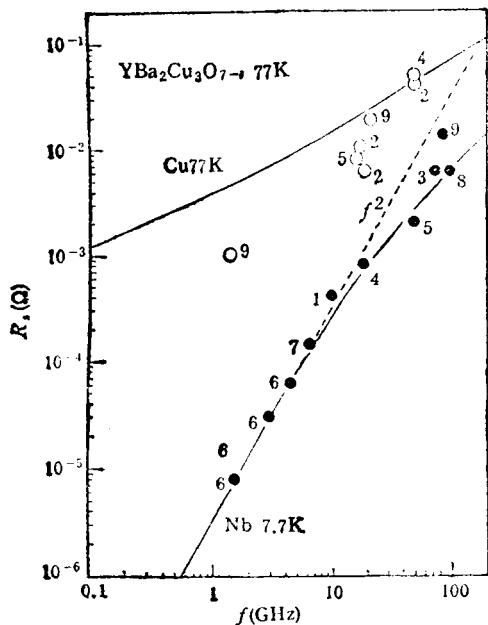


图 1 YBCO 薄膜的 R_s 与频率 f 的关系
 1. Conductus/HP 公司; 2. GEC/ICE 公司;
 3. Houston 大学; 4. Julich 核研究中心;
 5. 日本电报电话公司; 6. Lincoln 实验室;
 7. Siemens 公司; 8. 加州大学洛杉矶分校;
 9. Wuppertal 大学

图 2 给出了 YBCO 表面电阻 R_s 与温度 T 的关系^[7], 包括多晶与外延薄膜, 同时还给出了 Nb 与 Nb_3Sn 的结果。Nb 的 R_s 随 T 的变化按指数规律迅速下降。 Nb_3Sn 与此相近, 但有饱和的趋势。YBCO 在 $T_c/T \lesssim 1$ 附近 R_s 突然下降一至两个数量级, 与样品质量有关, 外延薄膜下降幅度大。随 T 的下降, YBCO 的 R_s 很快趋于一个饱和值 R_{s0} 。YBCO 的 R_{s0} 如此之高是出乎意料的。 R_{s0} 与样品的缺陷有很大关系, 但即使是高质量的样品, R_{s0} 仍然相当高。这使人们怀疑, HTSC 的本征特性是导致 R_{s0} 高的原因之一。其他的实验, 如隧道实验支持这个观点。但目前还不能对此问题下定论。

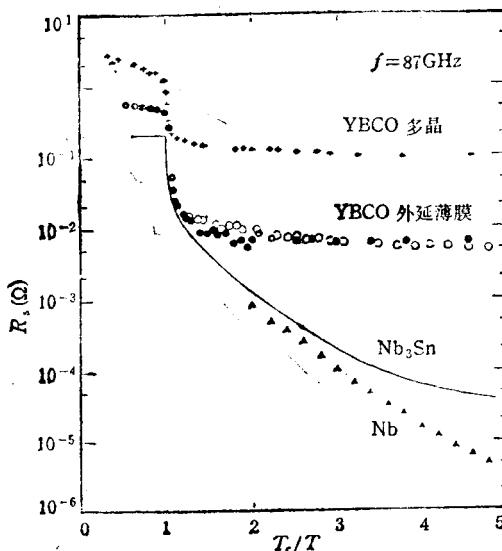


图 2 YBCO 薄膜的 R_s 与温度 T 的关系

图 3 给出了 HTSC 的 R_s 与微波表面磁场强度 B_{rf} 的关系^[7]。多晶薄膜的 R_s 随 B_{rf} 迅速上升, YBCO 单晶则变化很小, 而 YBCO 外延薄膜则几乎不变。这再一次说明样品质量能严重影响其微波性能。 R_s 与 B_{rf} 无关的性质正是高功率微波器件所需要的非常重要的性质。

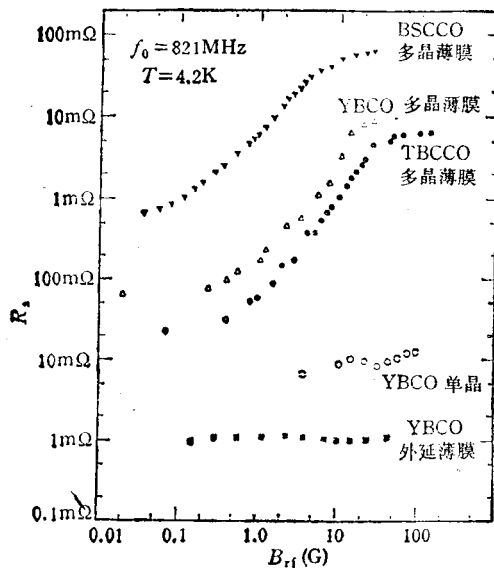


图 3 HTSC 的 R_s 与微波表面磁场强度 B_{rf} 的关系

在 77 K, 10 GHz 下, YBCO 外延薄膜的

R_s 的最好结果比 Cu 小 30—100 倍。BSCCO 薄膜的 R_s 约比 YBCO 高一个量级,这是由于它不容易制成单相外延薄膜,且表面平整度不高造成的。TlBaCaCuO 薄膜的微波特性则接近于 YBCO。c 轴取向的 Tl₂Ba₂CaCu₂O₈ 薄膜的 $R_s(10\text{GHz}, 4.2\text{K}) = (23 \pm 5)\mu\Omega$, 与最好的 YBCO 薄膜的结果 $(16 \pm 3)\mu\Omega$ 相近,但在 77 K 时, TBCCO 的 $R_s(=130\mu\Omega)$ 只有 YBCO 的 1/2。

YBCO 与 TBCCO 微波损耗如此之小是令人鼓舞的。用这样的薄膜制备微波元件,其性能将远远超过 Cu 薄膜器件,而接近性能良好但体积庞大的波导型器件。HTSC 薄膜微波器件的体积和重量都只是波导器件的 1/10,这对于许多微波系统来说是很重要的,对于卫星与航天飞机的通讯系统则是至关重要的。

3 HTSC 薄膜微波无源器件

许多实验室开展了 HTSC 薄膜微波无源器件的研究,并且已取得了显著的进展。这些器件中以谐振器和滤波器研究得最多。

表 1 列出了一些典型的 HTSC 薄膜微波谐振器的结构与特性。为了对比,表 1 中给出了超导器件与普通导体器件品质因数之比 Q/Q_N 。表 1 说明,HTSC 器件与普通导体器件相比, Q 值可高 10 倍。在 77 K 温度时,HTSC 5GHz 谐振器的 Q_0 值超过 10 000,而 10 GHz 谐振器的 Q_0 值超过 1 000。

一个典型的 5 GHz 谐振器的结构^[18]如下。基片为 $10 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 的 LAO,薄膜为 YBCO 或 TBCCO,中心导体宽 0.5 mm,长 7.8 mm,两端经 0.55 mm 的间隙与输入输出端耦合。YBCO 薄膜用电子束共蒸发法制备,淀积后在 900°C 湿氧中退火 30 min,在干氧中以 2°/min 速度冷却。YBCO 的 $T_{c0} = 91 \text{ K}$, $\Delta T_c \sim 1 \text{ K}$ 。用射频磁控溅射法制备 Ba₂CaCu₂O_x 膜,然后与 Tl₂Ba₂Ca₂Cu₃O₈ 粉及 Tl₂O₃ 粉末一起在 800—900°C 温度下热处理数分钟到 1 小时,得到 Tl₂Ba₂CaCu₂O₈ 取向薄膜, $T_{c0} = 106 \text{ K}$,

表 1 高温超导薄膜微波谐振器的特性

结构	材料	温度 (K)	f_0 (GHz)	Q_L^*	Q_0^{**}	Q/Q_N^{***}	文献
共面微带线	YBCO	77	6.0	—	3 850		[8]
悬置微带线	YBCO	77	1.4		3 800		[9]
微带线	YBCCO	77	2.5	7 000	10 000		[10]
微带线	TBCCO	77	2.3		10 000		[11]
反置微带线	YBCO	77	0.7	2 800	2 800	10	[12]
微带线	YBCO	77	1.4	4 300	2 500		[12]
微带线	YBCO	78	9.4	2 000		8—10	[13]
微带线	EuBCO	4	10	2 500	4 500	50	[14]
		70	10	1 000			
平行板	YBCO	77	1.5	1 211	1 439	3.2	[15]
微带线	YBCO	77	10		1 000	20	[16]
环形微带线	YBCO	77	15	230			[16]
			35		1 000	2	
环形微带线	YBCO	77	35		3 500	7	[17]
微带线	TBCCO	80	5	11 800		50	[18]
微带线	YBCO	80	5	5 900		25	[18]
微带线	YBCO	77	5		13 700		[19]
微带线	TBCCO	77	5		16 000		[19]
共面微带线	YBCO	77	4.75		1 620	9	[20]
微带线	YBCO	77	10		1 200	20	[21]
环形微带线	TBCCO	77	35	2 610	2 740	5—7	[22]

* Q_L ——加载品质因数, ** Q_0 ——无载品质因数,
*** Q/Q_N ——同样条件下超导谐振器与非超导体 (Cu, Ag 或 Au) 谐振器 Q 值之比。

表 2 高温超导薄膜微波滤波器的特性

序号	导体/地	极数	中心频率 (GHz)	带宽 (%)	温度 (K)	插入损耗 (dB)			文献	
						min	max	金属		
1	YBCO	2	10.2	1	4.22	2.3	20		[21]	
2	YBCO	3	9.5	0.5	77	3.2	7.5	18.5		[23]
3	YBCO/双面	4	4.2	3	77	0.3	0.4	2.8		[24]
4	YBCO/Cu	5	10.5	4	77	0.8	1.1			[25]
5	YBCO/YBCO	4	9.9	2	77	0.8	1.8			[26]
6	YBCO/Au	6	9.5	9	77	0.62		2.8		[27]
7	YBCO/Au	6	9.9	1.5	77	1	1.5			[28]
8	YBCO	3	9.5	0.5	77	4.5	6.6			[29]
9	YBCO/双面	4	6.2	5	77	0.27	1	1.15		[30]
10	YBCO/Au	3	13.3	3	77	0.2	1	2.5		[31]
11	YBCO/Au	5	55	4	77	1.7	7	7.3		[32]
12	TBCCO/Au	5	10	5	82	1.3	1.6			[22]
13	YBCO/Au	9	9.5	低通	77	0.2	1	2		[33]
14	GBCO 悬置	7	6	低通	77	0.33	1.4	1.2—3		[34]

* 指同样结构的正常金属滤波器的插入损耗

$\Delta T_c \approx 5 \text{ K}$ 。在 80 K 温度下, YBCO 与 TBCCO

物理

器件的 Q_L 值分别为 5 900 与 11 800, 与同样结构的 Au 膜器件 Q_L 值之比分别为 25 倍与 50 倍。

表 2 给出了一些典型的 HTSC 薄膜滤波器的特性。

图 4 给出了一个带通滤波器的结构 (a) 与特性 (b)。这是一个四极 Tchebycheff 型滤波器, 中心频率 f_0 为 4.2 GHz, 带宽为 $3\%f_0$ 。电子束共蒸发法在 LAO 片上下两面制备 YBCO 外延薄膜, 一面用来制备信号线, 另一面作为接地膜。在 77 K 时此滤波器插入损耗为 0.3 dB, 通频带很平坦。同样的 Au 膜滤波器的插入损耗为 2.8 dB。表 2 还给出了 f_0 为 9.5 GHz, 带宽为 $9\%f_0$ 的六级 Tchebycheff 的特性^[20]。信号线用 YBCO 薄膜制成, 接地面为 Au 膜, 77 K 时插入损耗为 0.62 dB。同样的 Au 膜滤波器插入损耗为 2.8 dB。

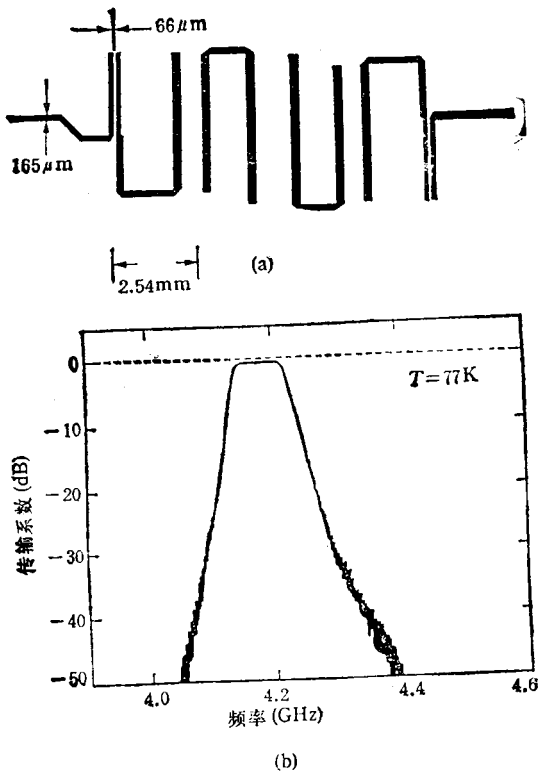


图 4 高温超导薄膜滤波器的结构 (a) 和特性 (b)

除了谐振器和滤波器外, 人们还成功地用

HTSC 薄膜制备了耦合器、延迟线、天线、开关等。一个研究组用 $\phi 5\text{cm}$ 的 LAO 片上的 YBCO 薄膜刻出螺旋形传输线(图 5), 形成 48 个返波耦合器, 组成线性调频脉冲滤波器。其中心频率 f_0 为 4.2 GHz, 带宽为 2.7 GHz, 总延迟时间为 14 ns, 插入损耗为 5 dB。这种滤波器配上混频器、带通滤波和取样电路后, 在雷达与通讯系统中可作实时信号分析。

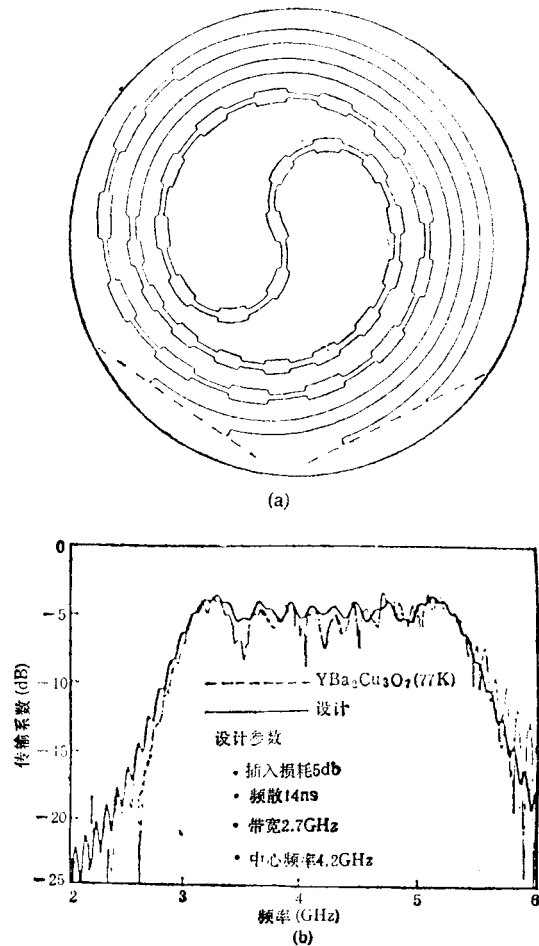


图 5 线性调频脉冲滤波器的结构 (a) 和性能 (b)

由于 HTSC 在微波器件中应用的诱人前景, 美国海军实验室于 1988 年开始实施了“高温超导电性空间实验”(简称为 HTSSE) 研究计划。其内容包括研制各种微波无源器件, 在卫星上进行检测, 其目的在于考查采用 HTSC 后所带来的优越性, 以便对空间飞行器进行重

大改革。HTSSE 第一阶段试验所用器件包括 14 个薄膜器件与一个体材料谐振腔^[10], 已通过了空间环境模拟试验, 准备在 1993 年升空进行轨道实验。该实验室已于 1991 年开始实施 HTSSE 第二阶段计划, 包括对信道滤波器组、天线阵列、延迟线、模拟信号处理器、带通接收机、60 GHz 通讯接收机、模拟-数字转换器及 GHz 数字多路调制器等复杂元件和子系统的研制及轨道实验(1996 年)。该实验室认为, HTSC 在微波系统中的应用是一项革命性的技术, 将使卫星与航天飞机的设计发生重大变化。

参 考 文 献

- [1] O. Meyer et al., *Phys. Rev. B*, **37** (1988), 9757.
- [2] J. Talvacchio et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 978.
- [3] J. Geerk, G. Linker and O. Meyer, *Materials Science Reports*, **4** (1989), 193.
- [4] X. D. Wu et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 1445.
- [5] D. K. Fork et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990), 1137.
- [6] K. Char et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990), 409.
- [7] H. Piel and G. Muller, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 854.
- [8] A. A. Valanguela, B. Daalmans and B. Roas, *Electron Lett.*, **25** (1989), 1435.
- [9] D. Kalokilis et al., *J. Electronic Materials*, **19** (1990), 117.
- [10] R. B. Hammond et al., *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, **2** (1990), 867.
- [11] R. B. Hammond et al., *IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Lecture V-5*, (1991).
- [12] M. Kuhn et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2809.
- [13] G. C. Liang et al., *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **AS-1** (1991), 58.
- [14] J. H. Takemoto et al., *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991), 1109.
- [15] S. A. Reible and C. W. Wilker, *IEEE Trans. Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2813.
- [16] J. H. Takemoto et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2549.
- [17] C. M. Chorey et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1480.
- [18] C. Wilker et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1462.
- [19] K. H. Yong et al., *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991), 1789.
- [20] M. R. Namordi et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1468.
- [21] C. M. Jackson et al., *J. Superconductivity*, **3** (1990), 305.
- [22] M. S. Schmidt et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1475.
- [23] D. Kalokitis et al., *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991), 537.
- [24] W. G. Lyons et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2537.
- [25] H. S. Newman et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2540.
- [26] S. H. Talisa et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2544.
- [27] D. B. Rensch et al., *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-27** (1991), 2553.
- [28] S. H. Greene et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1488.
- [29] L. H. Greene et al., *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991), 1629.
- [30] S. J. Hedges et al., *Electronics Lett.*, **27** (1991), 2312.
- [31] F. Suginosita et al., *Electronics Lett.*, **28** (1992), 355.
- [32] I. S. Gergis et al., *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992), 2026.
- [33] W. Chew et al., *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*, **MTT-39** (1991), 1455.
- [34] 曹效能等, *电子科学学刊*, **13** (1991), 413.

冯端、金国钧合著的《凝聚态物理学新论》评介

田 德 诚

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

1992 年底上海科学技术出版社出版了冯端院士与金国钧副教授合著的《凝聚态物理学新论》, 引起了学术界的注意。这是一本值得向广大读者特别是有志于在凝聚态物理学前沿进行科学探索的年轻科技工作者推荐的好书。

凝聚态物理学是材料科学的基础。许多新材料和新器件是在原来固体物理学成就的基础上发展起来的。明显的例子是能带论和半导体理论导致了众多半导体器件的发明; 超导的研究导致了超导体的广泛应用, 对提高人类的文