

# MgB<sub>2</sub> 超导薄膜的微波测量 \*

王淑芳<sup>1</sup> <sup>2)</sup> B. B. Jin<sup>3)</sup> 刘 震<sup>2)</sup> 周岳亮<sup>2)</sup> 陈正豪<sup>2)</sup> 吕惠宾<sup>2)</sup> 程波林<sup>2)</sup> 杨国桢<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002

<sup>2)</sup> 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080

<sup>3)</sup> Forschungszentrum Julich, Institute of Thin Films and Interfaces, D-52425 Julich, Germany

(2004 年 8 月 18 日收到, 2004 年 9 月 16 日收到修改稿)

报道了利用蓝宝石介质谐振器技术测量 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜的微波表面电阻  $R_s$ 、0 K 时的穿透深度  $\lambda(0)$  和超导能隙  $\Delta(0)$ .  $\lambda(0)$  和  $\Delta(0)$  的值是通过先测量样品穿透深度  $\lambda(T)$  的变化量  $\Delta\lambda(T)$ , 然后由 BCS 理论模型拟合  $\Delta\lambda(T)$  的实验数据得到的. 测试样品是利用化学气相沉积技术在 MgO(111) 基片上制备的  $c$  轴织构的 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜, 薄膜的超导转变温度和转变宽度分别为 38 K 和 0.1 K. 微波测试结果表明在 10 K, 18 GHz 下 MgB<sub>2</sub> 薄膜的  $R_s$  约为 100  $\mu\Omega$ , 可以和高质量的 YBCO 薄膜的  $R_s$  值相比拟; BCS 理论拟合得到的 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜的  $\lambda(0) = 102 \text{ nm}$ ,  $\Delta(0) = 1.13 \text{ kT}_c$ .

关键词: 微波表面电阻, 穿透深度, MgB<sub>2</sub> 超导薄膜

PACC: 7475, 7430C, 7490

## 1. 引言

MgB<sub>2</sub> 超导体是近年来超导领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>. MgB<sub>2</sub> 薄膜微波测量对于理解 MgB<sub>2</sub> 超导体的物理特性、探寻 MgB<sub>2</sub> 超导体在微波领域的潜在应用价值都具有非常重要的意义.

超导体的微波测量属于极低损耗问题, 通常使用谐振法. 本文介绍了利用蓝宝石介质谐振器对 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜的微波表面电阻和穿透深度的测量, 并对测量结果进行了讨论.

## 2. 实验装置与方法

本实验采用蓝宝石介质谐振器测量 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜的微波表面电阻  $R_s$  和穿透深度  $\lambda(0)$ , 实验装置示意图如图 1 所示. 谐振腔工作在  $\text{TE}_{011}$  模式, 工作频率为 18 GHz.

测试样品为利用 CVD 技术在 MgO(111) 单晶基片上制备的 MgB<sub>2</sub> 超导薄膜<sup>[4]</sup>, 薄膜大小为 10 mm × 10 mm, 厚度约 600 nm. 图 2(a) 为利用四点法测量得

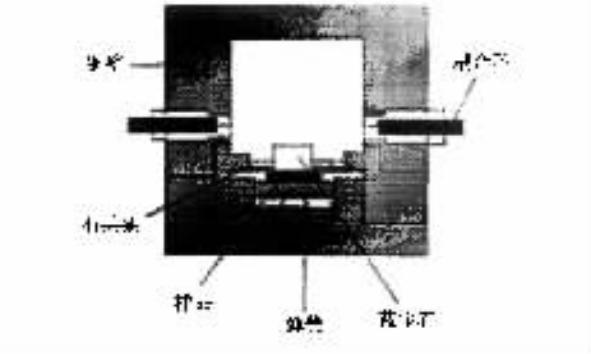


图 1 微波测量装置示意图

到的样品的超导转变曲线, 超导转变温度为 38 K, 超导转变宽度仅为 0.1 K. 图 2(b) 对应地给出了样品的 XRD 测试结果. 除了基片的衍射峰和 MgB<sub>2</sub>(101) 衍射峰外, 图中其余两个较强的峰分别对应于 MgB<sub>2</sub>(001) 和 MgB<sub>2</sub>(002) 衍射峰, 表明样品为  $c$  轴织构的 MgB<sub>2</sub> 薄膜.

我们将样品放置在蓝宝石介质下方, 通过测量谐振腔无载品质因数  $Q_0$  的变化来计算出样品的表面电阻<sup>[5]</sup>.

\* 国家重点基础研究专项经费(批准号: 2002CB312204)资助的课题.

† E-mail: wsf@aphy.iphy.ac.cn

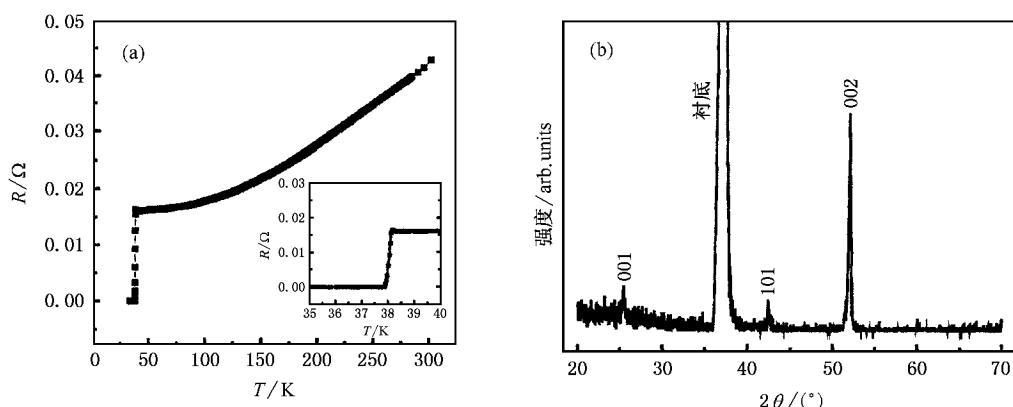


图 2 \$\mathrm{MgB}\_2/\mathrm{MgO}(111)\$ 薄膜的(a) \$R-T\$ 曲线和(b) XRD 谱图

$$R_s(T) = G \left[ \frac{1}{Q_0(T)} - \frac{1}{Q_0(4.2K)} \right], \quad (1)$$

式中几何因子 \$G = 740 \Omega\$, 可以通过数学模拟腔内电磁场的分布得到. \$Q\_0(T)\$ 为放入样品后谐振腔的无载品质因数; \$Q\_0(4.2K)\$ 为 4.2 K 时谐振腔的无载品质因数, \$Q\_0(4.2K)\$ 的值可以用 \$Q\_{\text{Nb}}(4.2K)\$ 近似替代, 可以用高质量的 Nb 膜作为测试样品得到 \$Q\_{\text{Nb}}(4.2K) = 92000\$. 在测量过程中, 由于忽略了谐振腔的损耗和 Nb 膜的微波损耗 (\$R\_s \approx 10^{-5} \Omega\$), 由(1)式确定的 \$\mathrm{MgB}\_2\$ 薄膜样品的微波表面电阻的系统误差约为 \$0.1 \text{ m}\Omega\$.

利用谐振器技术无法直接测量样品的穿透深度 \$\lambda(0)\$, 可以先测量样品穿透深度随温度的变化量 \$\Delta\lambda(T) = \lambda(T) - \lambda(0)\$, 然后用理论模型拟合出 \$\lambda(0)\$. 即将理论模型中的 \$\lambda(0)\$ 看作是一个可调参数, 通过调整 \$\lambda(0)\$ 使理论模型拟合的 \$\Delta\lambda(T)\$ 和实验测量的 \$\Delta\lambda(T)\$ 符合, 如果符合得很好, 就将理论模型的 \$\lambda(T)\$ 作为所测样品的 \$\lambda\$ 随温度变化的规律, 通过调整所得到的 \$\lambda(0)\$ 作为样品的 \$\lambda(0)\$. 实验中 \$\Delta\lambda(T)\$ 的测量是通过测试谐振频率的变化来实现的<sup>[5]</sup>:

$$\Delta\lambda(T) = -\frac{G}{\pi\mu_0} \frac{f(T) - f(5K)}{f^2(5K)}, \quad (2)$$

式中 \$\mu\_0 = 1.256 \times 10^{-6} \text{ Vs/Am}\$, 由(2)式可以得出, 当穿透深度变化 1 nm 时对应的频率变化为 1.7 kHz. 实验中 \$\Delta f\$ 的统计测量误差为 0.6 kHz, 所以可以估算出 \$\Delta\lambda\$ 的分辨率约为 0.4 nm.

### 3. 实验结果和讨论

图 3 为根据(1)式测量得到的 \$\mathrm{MgB}\_2\$ 薄膜样品在

超导转变温区微波表面电阻 \$R\_s\$ 随温度变化的曲线. 由微波测量得到的样品的超导转变温度 \$T\_c\$ 约为 38 K, 基本上和由直流电阻率测量得到的结果一致. 不同的是微波表面电阻测量显示的转变宽度比较宽, 这可能是因为在微波测量中重要的是全平面的影响和表面效应而在直流电阻率测量中重要的是超导电通路. 温度在 \$T\_c\$ 以上时, \$R\_s\$ 为正常态电阻 \$R\_n\$, \$T\_c\$ 以下表面电阻 \$R\_s\$ 急剧下降. 10 K 时, 样品的微波表面电阻仅为 \$100 \mu\Omega\$ (18 GHz), 可以和优质的 YBCO 超导薄膜的 \$R\_s\$ 值相比拟, 预示着 \$\mathrm{MgB}\_2\$ 薄膜在微波领域具有诱人的应用前景.

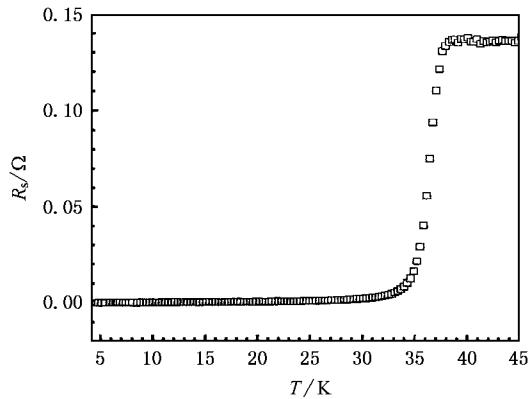


图 3 \$\mathrm{MgB}\_2\$ 薄膜样品的微波表面电阻随温度的变化曲线

我们用 BCS 理论公式<sup>[6]</sup>对上图中 \$T/T\_c < 0.5\$ 温区范围内的 \$R\_s\$ 实验数据进行了拟合. 图 4 给出了拟合结果, 图中原点符号为实验数据, 实线为 BCS 理论拟合曲线. 可以看出, 在这个温区内 \$\mathrm{MgB}\_2\$ 薄膜样品表面电阻 \$R\_s\$ 的实验数据和 BCS 理论拟合的结果基本符合, 随温度 \$T\$ 指数下降. 但当温度降到 \$T \ll

$T_c$  的低温区,  $R_s$  开始偏离指数关系, 逐渐趋向与温度无关的恒定值  $R_{\text{res}}$ .  $R_{\text{res}}$  是剩余电阻, 它由样品中的杂质、不均匀性及表面粗糙度等因素决定, 越是完整的样品,  $R_{\text{res}}$  值越低<sup>[7]</sup>. 图 4 的测试结果显示  $\text{MgB}_2$  薄膜样品的  $R_{\text{res}}(4.2 \text{ K})$  仅为  $11.3 \mu\Omega$ , 说明我们利用 CVD 技术制备的  $\text{MgB}_2$  超导薄膜的质量非常好.

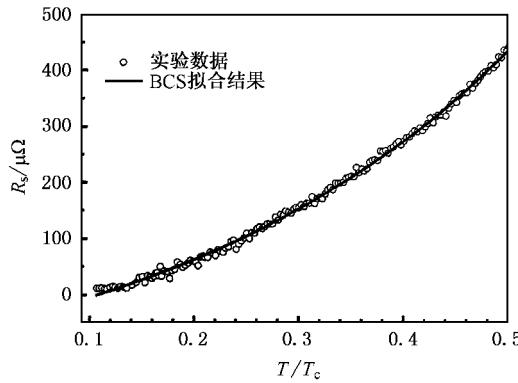


图 4 在  $T/T_c < 0.5$  的温区内  $\text{MgB}_2$  薄膜样品的  $R_s$  随  $T/T_c$  的变化曲线

图 5 为根据(2)式测量得到的  $\text{MgB}_2$  薄膜样品的穿透深度的变化量  $\Delta\lambda$  随约化温度  $T/T_c$  的变化曲线

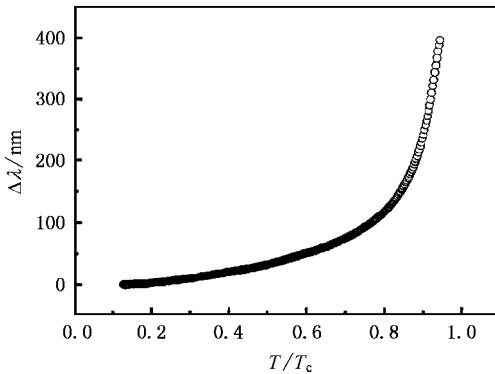


图 5  $\text{MgB}_2$  薄膜样品的  $\Delta\lambda(T)$  曲线

同位素效应<sup>[8]</sup>和比热测试<sup>[9]</sup>结果表明  $\text{MgB}_2$  是以声子为媒介的 S 波超导体. 按照 BCS 理论 S 波对称的库柏对可通过热激发被部分拆散, 变为具有正常态特性的准粒子, 其密度依照  $\exp(-\Delta/k_B T)$  随温度  $T$  变化, 微波穿透深度之差  $\Delta\lambda$  也随  $T$  按指数规律变化. 所以, 为了得到较为合理的  $\lambda(0)$ , 我们采用

BCS 理论<sup>[5]</sup>对  $\Delta\lambda(T)$  的实验数据进行了拟合, 不断调整拟合参数  $\lambda_0$  和  $\Delta(0)/kT_c$  的值, 直到拟合曲线和实验数据符合. 为了便于拟合, 把图 5 中的坐标作一下改变, 纵坐标取对数坐标  $\lg\Delta\lambda$ , 横坐标取温度的倒数  $T_c/T$ . 图 6 给出了利用 BCS 理论拟合得到的结果. 可以看出, 在整个拟合温区内, 拟合曲线和实验数据都非常符合, 此时我们得到  $\lambda_0 = 102 \text{ nm}$ ,  $\Delta(0)/kT_c = 1.13$ . 我们得到的  $\Delta(0)/kT_c$  的值要小于 BCS 理论预言的 1.76. 能带结构的理论计算<sup>[10]</sup>和点接触谱<sup>[11]</sup>、拉曼光谱<sup>[12]</sup>、光发射谱<sup>[13]</sup>、核磁共振<sup>[14]</sup>和扫描隧道光谱<sup>[15]</sup>等诸多的实验结果都证实了在  $\text{MgB}_2$  中存在两个能隙, 我们认为本实验测量得到的能隙为其中一个较小的能隙.

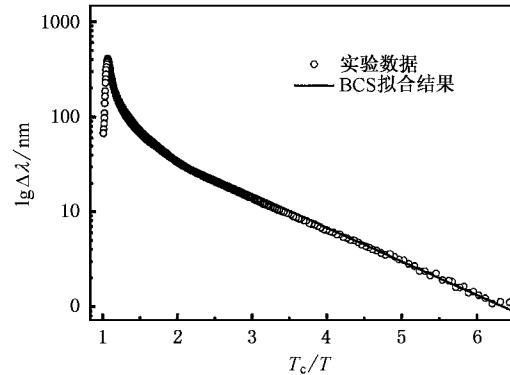


图 6  $\text{MgB}_2$  薄膜样品的  $\lg\Delta\lambda - T_c/T$  曲线, 实线为 BCS 理论拟合结果

#### 4. 结 论

本工作利用蓝宝石介质谐振器测量了  $\text{MgB}_2$  超导薄膜的微波表面电阻和穿透深度. 测试所用的  $\text{MgB}_2$  样品是利用化学气相沉积技术在  $\text{MgO}(111)$  基片上制备的  $c$  轴织构薄膜, 薄膜的超导转变温度和转变宽度分别为 38 K 和 0.1 K. 微波测试结果表明  $\text{MgB}_2$  薄膜的  $R_s$  在 10 K, 18 GHz 下约为  $100 \mu\Omega$ , 可以和高质量的 YBCO 的  $R_s$  值相比拟. 利用 BCS 理论拟合  $\Delta\lambda(T)$  实验数据得到的穿透深度  $\lambda(0) = 102 \text{ nm}$ 、能隙  $\Delta(0) = 1.13 kT_c$ , 我们得到的  $\Delta(0)$  比 BCS 理论预言的  $1.76 kT_c$  要小, 它可能是来自于  $\text{MgB}_2$  双能隙中较小的一个能隙.

- [ 1 ] Nagamatsu J , Nakagawa N , Muranaka T , Zenitani Y and Akimitsu J 2001 *Nature* **410** 63
- [ 2 ] Jin S , Mavoori H , Bower C and van Dover R B 2001 *Nature* **411** 563
- [ 3 ] Zhao Z W , Wen H H , Li S L , Ni Y M , Ren Z A , Che G C , Yang H P , Liu Z Y and Zhao Z X 2001 *Chin. Phys.* **10** 340
- [ 4 ] Wang S F , Zhu Y B , Liu Z , Zhou Y L , Zhang Q , Chen Z H , Lu H B , Dai S Y and Yang G Z 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1356
- [ 5 ] Jin B B , Klein N , Kang W N , Kim H J , Choi E M , Lee S I , Dahm T and Maki K 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 205
- [ 6 ] Turneaure J P , Halbritter J and Schwettman H A 1991 *J. Supercond.* **4** 341
- [ 7 ] Lin L Z 1998 *Superconductivity and Applications* ( Beijing : Beijing University of Technology Press ) p 422 ( in Chinese [ 林良真 1998 超导电性及其应用 ( 北京 北京工业大学出版社 ) 第 422 页 ] )
- [ 8 ] Bud'ko S L , Lapertot G , Petrovic C , Cunningham C E , Anderson N and Canfield P C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1877
- [ 9 ] Bouquet F , Fisher R A , Philips N E , Hinks D G and Jorgensen J D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 47001
- [ 10 ] Liu A Y , Mazin I I and Kortes J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 087005
- [ 11 ] Szabo P , Samuely P , Kacmarcik J , Klein T , Marcus J , Fruchart D , Miraglia S , Marcenat C and Jansen A G M 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 137005
- [ 12 ] Chen X K , Konstantionvic M J and Irwin J C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 157002
- [ 13 ] Takahashi T , Sato T , Souma S , Muranaka T and Akimitsu J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4915
- [ 14 ] Kotegawa H , Ishida K , Kitaoka Y , Muranaka T and Akimitsu J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 127001
- [ 15 ] Iavarone M , Karapetrov G , Koshelev A E , Kwok W K , Crabtree G W and Hinks D G 2001 *Phys. Rev. Lett.* **89** 187002-1

## Microwave measurements of the MgB<sub>2</sub> thin film \*

Wang Shu-Fang<sup>1,2)†</sup> B. B. Jin<sup>3)</sup> Liu Zhen<sup>2)</sup> Zhou Yue-Liang<sup>2)</sup> Chen Zheng-Hao<sup>2)</sup>  
Lü Hui-Bin<sup>2)</sup> Cheng Bo-Lin<sup>2)</sup> Yang Guo-Zhen<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> College of Physics and Technology , Hebei University , Baoding 071002 , China )

<sup>2)</sup> Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

<sup>3)</sup> Forschungszentrum Julich , Institute of Thin Films and Interfaces , D-52425 Julich , Germany )

( Received 18 August 2004 ; revised manuscript received 16 September 2004 )

### Abstract

We have measured the microwave surface resistance  $R_s$  , the magnetic field penetration depth  $\lambda(0)$  and the energy gap  $\Delta(0)$  of MgB<sub>2</sub> thin films using the dielectric resonator technique. The  $c$ -axis textured sample , with superconducting transition temperature of 38K and transition width of 0.1 K , was prepared on MgO( 111 ) substrates by the chemical vapor deposition method. The  $R_s$  value of the MgB<sub>2</sub> thin film at 10 K was found to be as low as  $100 \mu\Omega$  , which is comparable to that of a high-quality high-temperature thin film of YBCO. BCS fits of the temperature dependence of  $\Delta\lambda$  of the MgB<sub>2</sub> thin film gave  $\lambda(0)=102$  nm and  $\Delta(0)=1.13 kT_c$  .

**Keywords :** microwave surface resistance , penetration depth , MgB<sub>2</sub> thin film

**PACC :** 7475 , 7430C , 7490

\* Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China( Grant No. 199064604 ).

† E-mail : wsf@aphy.iphy.ac.cn