

# YBCO 约瑟夫森结的制作 与约瑟夫森效应的验证

潘坚 08301030016

复旦大学物理系 200433

**摘要:** 我们对利用实验室提供的 YBCO 块状样品进行物理的加工处理, 打磨形成超导结。并利用现有的条件进行约瑟夫森结的测量验证。本文从理论上分析了约瑟夫森效应的相关结果, 并通过实验与理论进行对比, 找出实际操作过程中的注意点。

**关键词:** 约瑟夫森效应, YBCO 约瑟夫森结, 隧道结, 微波

**引言:** 超导 Josephson 结又称弱连接结。弱连接是指两块超导体通过某种方式形成弱耦合的结构。Josephson 曾预言在超导体-绝缘层-超导体 (SIS) 隧道结结构中, 两侧超导体通过势垒层相互耦合, 当势垒层足够薄时, 出现的奇特物理现象。超导电子器件是基于 Josephson 效应而研制成功的新型电子器件。与半导体器件相比, 超导电子器件具有高度非线性、噪声低、工作频带宽、功率小、体积小、抗干扰能力强等众多独特优点。所以研究 Josephson 结的性质对超导的发展和应该用具有非常重要的意义。

## 理论分析

### 1. 约瑟夫森效应

对于一个 YBCO 的超导体-绝缘层-超导体的约瑟夫森结结构如果我们在超导结的两端加上一个直流电压  $V$ , 则在约瑟夫森结区中会出现一个高频振荡的正弦波隧道电流, 其频率和所加的直流电压成正比有如下关系式

$$\nu = \frac{2e}{h} \cdot V = (483.6 \times 10^6 \text{Hz}/\mu\text{V}) \cdot V$$

即每加  $1\mu\text{V}$  的电压存在  $483.6\text{MHz}$  的高频隧道电流。所加电压在几微伏时, 电流频率在 GHz 量级, 若为几毫伏, 则电流频率在  $10^{12}\text{Hz}$  段。由于约瑟夫森结的高频辐射功率很小 (约为  $10^{-11}\text{W}$ ), 交流约瑟夫森效应的检测很难通过一般直接接受电磁波辐射的方法实现, 而需要采用间接的检测方法。

当超导结两端出现直流电压  $V_0$  时, 结中超导隧道电流密度

$$J_s = J_c \sin\left(\frac{2e}{h} V_0 t + \varphi_0\right)$$

上式对时间的平均值为零, 因此, 在直流的 I-V 特性曲线上反映不出高频电流的存在。为此, 在结上除了加直流偏置电压  $V_0$  以外再加上一个振幅为  $V_m$  的交变电压  $V_m(\cos(\Omega t + \alpha))$ 。A 为交变电压的初始相位。在恒压源模型下可以证明, 结中的电流可以表示为

$$J_s = J_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n J_n(2eV_m/h\Omega) \sin[(\omega - n\Omega)t - n\alpha + \varphi_0]$$

其中  $J_n(2eV_m/h\Omega)$  为  $n$  阶贝赛尔函数。

由上式可得, 此时节点流中包含了各种谐波成分, 每当  $\omega = n\Omega$ , 即解得约瑟夫森频率  $\omega$  与外加交变频率  $\Omega$  的  $n$  倍相等时, 隧道电流中即出现不随时间变化的直流项。因此, 当将结两

端的电压  $V$  做扫描时，在结的  $I - V$  特性曲线上，将出现一系列的直流电流成分，形成等电压间隔的电流台阶，电流竖柱的电压间隔由交变电压的频率  $\Omega$  锁决定。

实验中我们采用  $3\text{cm}$  的微波对约瑟夫森结进行照射，理论计算的电压间隔为  $\Delta V = 20\mu\text{V}$ 。

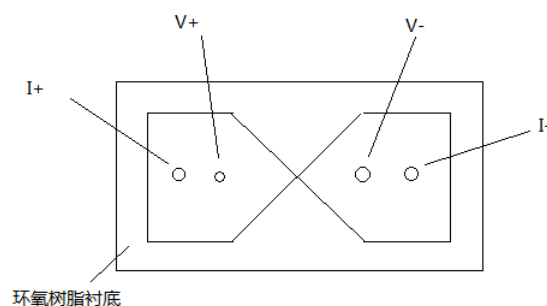
## 2. 约瑟夫森结的制作

约瑟夫森结是由两块超导体之间夹一层很薄的绝缘层构成，形成约瑟夫森结的要点是两边超导体之间形成微弱的电子能量耦合。绝缘层形式是一种减弱两超导体之间电子对耦合的方式，通过狭窄的区域超导连接也是一种减弱电子对耦合的方式。狭窄区域尺寸需要小于材料的相干长度，通常为  $1\mu\text{m}$  数量级。YBCO 这种高温氧化物超导体，由于内部存在晶粒间的耦合，所以多晶氧化物超导体也能呈现约瑟夫森结。

## 实验内容

### 1. YBCO 约瑟夫森结的制作

实验采用最简单的方法制备约瑟夫森结，我们将 YBCO 块状材料通过 AB 胶粘在环氧树脂基板上。对 YBCO 样品进行打磨，在块状样品中间雕刻加工出现桥型的结构。我们将块状样品打磨到弱连接处的长度、宽度和厚度都在  $0.1\text{mm}$  附近。样品的四段引线用钢粒压于超导材料商，再把银丝焊到电极上。用双面胶将环氧树脂极板与低温探棒上的环氧底板粘合。

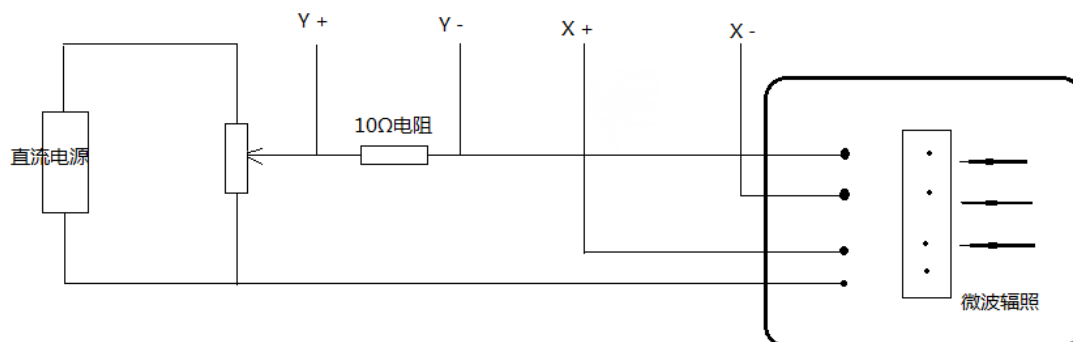


加工约瑟夫森结的时候，我们要的是中间的连接尽可能薄，但是又不能完全锉断，在用锉刀打磨的一段时间我们需要用欧姆表测量样品的电阻。不仅要确保中间不能磨断，还要注意样品的电阻不能太大，一般在  $1-2\Omega$  或者更小（如果样品的电阻达到  $10\Omega$  以上，虽然还保持着通路的状态，但可能是已经破坏了 YBCO 的晶体结构，他可能已经失去超导性）。

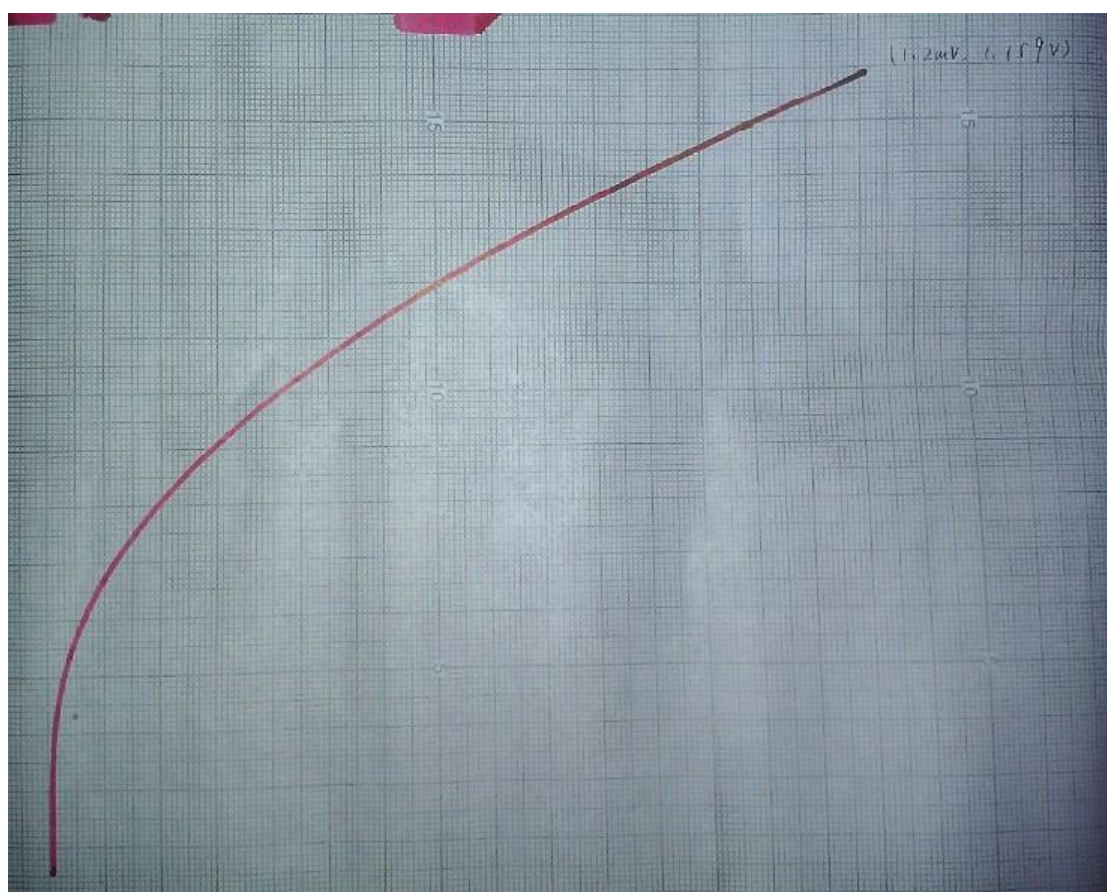
### 2. 约瑟夫森效应的实验电路设计

约瑟夫森效应的核心在于测量约瑟夫森结在不加微波辐照和加上固定频率的微波辐照时候的  $I - V$  特性曲线。直流电源配合滑动变阻器可以提供一个可连续变化的扫描电压。通过测量 2、3 两个接线之间的电压可以确定样品两端的电压；通过测量与样品串联的  $10\Omega$  定值电阻两端的电压可以得到样品中通过的电流信号。电压和电流信号分别输入到 X-Y 实验记录仪的 X 输入口和 Y 输入口，我们就可以在 X-Y 记录仪上输出得到伏安特性曲线。

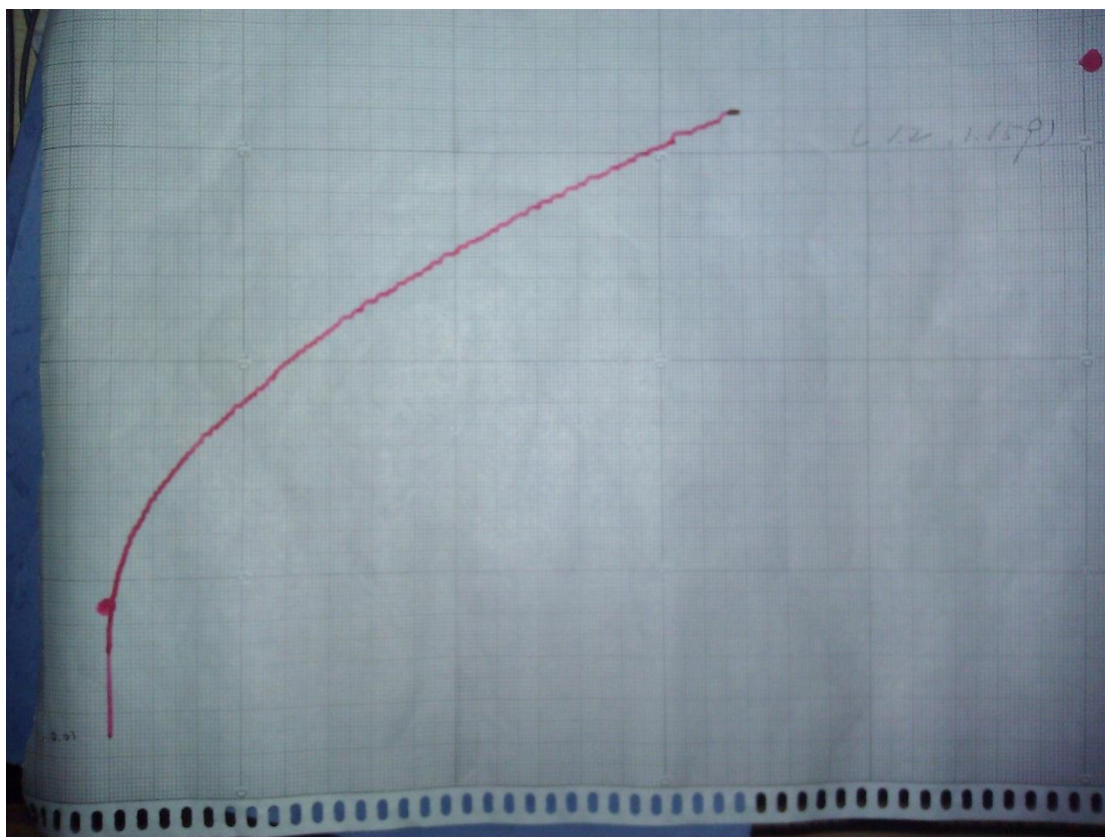
方框内的部分被封装在样品杆低温探棒内，微波有低频信号发生器产生，并通过封装在样品杆内的波导腔传播并照射到样品表面。这样的电路可以将样品杆放置到液氮中。



### 3. 数据处理

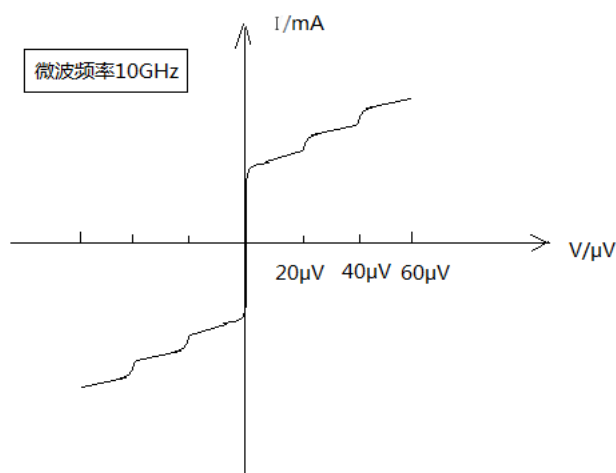


不加微波辐照时样品的 I-V 特性曲线，X 轴表示结两端电压，Y 轴表示  $10\Omega$  定制电阻两端的电压（正比与通过结的电流）。从图像上可以直观的看出，增大电流时，电压保持为零。当电流增大到一定临界数值时，电压随电流的增加而增大。



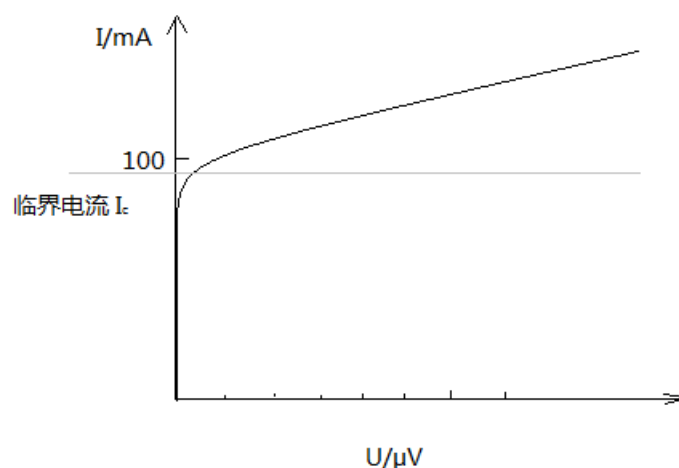
当我们将样品加上一个  $10\text{GHz}$  的微波辐照时，我们可以看到有一些小的波动，但这些波动不太明显，而且分布并不均匀，电压宽度大致是在  $50\ \mu\text{V}$  的附近。并且由于 X-Y 记录仪的测量的一些波动等因素我们也没有得到重复性的实验结果。因而不能认为这些波动是由于约瑟夫森效应造成的。

理论上得到的约瑟夫森效应的图像应该如下图，在加入  $10\text{GHz}$  微波的情况下我们可以得到电压间隔为  $20\ \mu\text{V}$  的一个个台阶。



我们得到的图像与普通的块状 YBCO 样品的 I-V 特性曲线比较接近，增大电流时，电压保持为零。当电流增大到一定临界数值时，电压随电流的增加而增大。





我们对图像进行分析可以得到临界电流

$$I_c = \frac{5}{14.5} \times \frac{1.159}{10} = 71.94 \text{mA}$$

### 结果与讨论

本实验的难于突破的两个方面在于:约瑟夫森结的制备及保护和保证电压测量仪器的精度和抗噪。

- (1) YBCO 约瑟夫森结的打磨中我们需要关注更多的细节,首先是环氧底板与 YBCO 粘合过程中,中间段可以不需要涂上胶,而两边固定上以方便打磨,这样可以方便后期的打磨。其次是对样品的保护,实验中使用的 YBCO 材料,吸水之后会改变材料的特性,影响转变温度和临界电流。甚至可能会导致丧失超导性,成为半导体。而约瑟夫森结制作的成功与否,无法直观的看出,最终需要验证其是否发生约瑟夫森效应,因而需要多次的取出和重新打磨,但从液氮中取出,因为温度太低样品不可避免的凝结一定的空气水分,这回对样品性质带来一定破坏。我们需要对样品进行烘干并保持在不用的时候放置于干燥管里。
- (2) 在实验中,所加微波辐照为 10GHz 是,约瑟夫森效应表现为 I-V 特性曲线中的台阶,台阶的电压间隔为 20 μV,是一个很小的数值,因而我们的仪器一方面要达到很高的测量精度,另一方面我们要尽可能的减少电路中的干扰电压信号。实验室提供的传统的 X-Y 记录可以提供 5 μV/cm 的测量精度,但稳定性不够好,并且数据读取即时性也没有很好的满足。而电脑化的 X-Y 记录仪就可以很好的满足测量的稳定性和即时性,但是电路中的噪声还是比较大,数据波动比较明显。我们也没能够用电脑化 X-Y 记录仪得到很好的结果。实验中我们可以通过给通约瑟夫森结的四引线上接入穿心电容以达到过滤其他噪声电流的作用。
- (3) 测量装置除了采用 X-Y 记录仪也可尝试使用示波器以记录 I-V 曲线。实验电路中的可改变的提供直流电压电源。可以用一个低频信号发生器来替代(低频信号发生器可以提供周期性的连续电压的扫描信号),CH1 接入约瑟夫森结两端的电压而 CH2 接入定制电阻的两端的电压。这两个信号都是以相同的频率低频周期性的变化。这样也可以在示波器上直接得到 I-V 曲线。

### 小结

对约瑟夫森效应的验证，我们没有得到满意的结果，因而无法准确的判断约瑟夫森结的好坏与否。由样品的 I-V 特性曲线中我们得到了超导样品的临界电流 71.94mA。临界电流的数值一般在几十微伏到几十毫伏之间，实验的结果与之相符。

### 致谢

感谢姚红英老师和王人甫老师的技术指导，感谢实验合作者冯冬笙同学的帮助。

### 参考文献：

- [1] 戴道宣. 近代物理实验.第二版. 北京: 高等教育出版社
- [2] 马海霞. 高温超导 YBCO 颗粒膜桥型器件的 8mm 微波视频检测. 低温物理学报, 2000