

约瑟夫森效应实验

(实验日期: 2025 年 9 月 10 日)

超导现象是指当温度下降到某一临界温度以下时, 材料展现出零电阻特性和完全抗磁性, 这是超导态的两个基本特性. 超导电性源于电子的配对和相干凝聚, 常规低温导体两电子之间通过声子作用相互吸引, 形成库珀对. 约瑟夫森效应是指两块超导体被一绝缘薄层分开时库珀对的量子隧穿现象, 分为直流约瑟夫森效应和交流约瑟夫森效应, 在量子电压基准, 超导量子电路, 高灵敏度测量仪器等领域有重要应用. 本实验测量高温超导体 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超导临界电流, 观测直流约瑟夫森效应得到 77K 温度下的约瑟夫森临界电流, 以及观察微波辐照下的交流约瑟夫森效应并测量得到微波频率, 验证了约瑟夫森效应理论的正确性.

关键词: 约瑟夫森效应, 超导, 双晶约瑟夫森结

I. 引言

1911 年荷兰物理学家昂内斯 (H. Kamerlingh Onnes) 在研究汞的电阻率时发现, 当温度降低到 4.2K 时, 汞的电阻率突然降为零, 这种现象被称为超导现象. 零电阻特性和完全抗磁性是超导态的两个基本特性, 分别是指超导体在超导态下电阻为零, 超导体在超导态下能完全排斥外加磁场. 超导体根据其临界温度与液氮温度的关系可以分为低温超导体和高温超导体. 1957 年美国三位科学家巴丁 (J.Bardeen)、库珀 (L.N.Cooper) 和施里弗 (J.R.Schrieffer) 提出了 BCS 理论, 揭示了超导电性源于库珀对 (Cooper pair) 的相干凝聚. 其中, 常规低温导体两电子之间通过声子作用相互吸引, 形成库珀对; 而对于非常规的高温超导体, 其库珀对的形成机制尚未完全弄清. 1962 年, 约瑟夫森 (B. D. Josephson) 预言了两块超导体被一绝缘薄层分开时库珀对的量子隧穿现象, 即约瑟夫森效应, 分为直流约瑟夫森效应和交流约瑟夫森效应. 直流约瑟夫森效应是指在没有加电压的情况下, 超导电流可以通过绝缘层隧穿, 其最大值称为约瑟夫森临界电流, 交流约瑟夫森效应是指当在约瑟夫森两端电压不为 0 时, 仍然有通过结的超导隧穿电流, 频率为 $f = 2eV/h$, 其中 e 为元电荷, h 为普朗克常数. 约瑟夫森效应是宏观量子效应的重要体现, 在量子电压基准, 超导量子电路, 高灵敏度测量仪器等领域有重要应用 [1].

本实验使用的约瑟夫森结为高温超导体 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 材料以双晶衬底方式实现弱连接构成的双晶约瑟夫森结. 实验首先测量了该双晶约瑟夫森结的超导临界温度; 接着观察直流约瑟夫森效应, 得到约瑟夫森临界电流; 最后给约瑟夫森结加微波辐照而观察到夏皮罗台阶, 即交流约瑟夫森效应, 并测量得到微波频率. 通过对以上现象的观察, 可以进一步加深对超导现象、约瑟夫森效应以及宏观量子现象的理解.

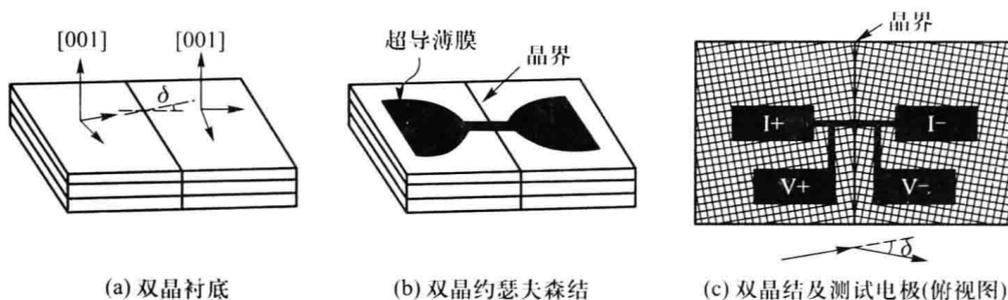


图 1. 双晶约瑟夫森结示意图:(a) 双晶衬底, 其晶界两侧品粒的品轴 (平行于衬底表面) 取向不同, 夹角为 δ . (b) 在双晶衬底上外延生长超导薄膜, 然后在晶界附近刻蚀出超导微桥形成双晶约瑟夫森结. (c) 双晶约瑟夫森结的俯视示意图, 其中包括和双晶结相连的测试电极以实现标准的四引线法测量.

II. 实验装置

A. 实验装置示意

实验装置主要分为三个部分, 测量系统 (约瑟夫森效应观测仪, DH1121C 型微波信号源, 惠普 33120A 函数发生器), 记录系统 (TYPE3086X-Y RECORDER) 和降温系统 (液氮罐, 样品杆). 其中约瑟夫森效应观测仪主要包括恒流源、定值电阻及相应的测试线路和控制开关. 样品杆上内部装有铂电阻温度计和待测样品.

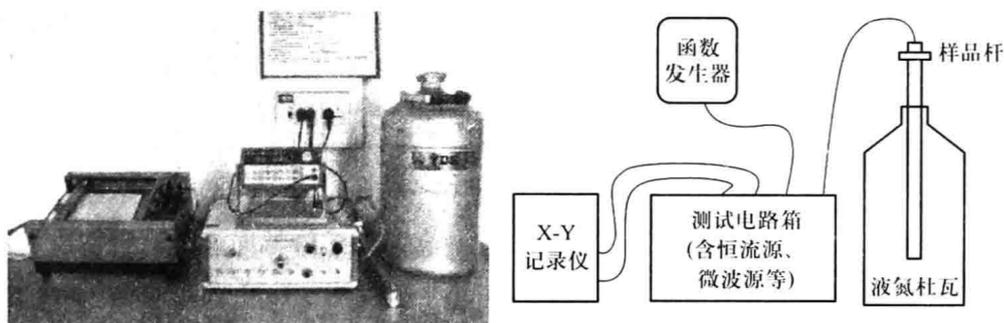


图 2. 约瑟夫森效应测试装置实物图 (左) 和结构示意图 (右).

其中, 测量系统和记录系统之间的连接示意图如图 2 所示.

当测量约瑟夫森结的 $R - T$ 曲线时, $X - Y$ 记录仪的 x 轴输入为铂电阻温度计两端电压 V_T , y 轴输入为约瑟夫森结两端电压 V_J . 给铂电阻温度计供电的恒流源输出电流为 $0.9mA$, 给约瑟夫森结供电的恒流源输出电流为 $50\mu A$. 由铂电阻两端的电压和通过铂电阻的电流可以计算出铂电阻的电阻值 $R_T = V_T/I_T$, 再查铂电阻电阻值和温度的关系表可以得到每个时刻的温度. 由约瑟夫森结两端的电压和通过约瑟夫森结的电流可以计算出约瑟夫森结的电阻值 $R_J = V_J/I_J$. 由此可以得到约瑟夫森结的 $R - T$ 曲线.

当测量约瑟夫森结的 $V - I$ 曲线时, $X - Y$ 记录仪的 x 轴输入为定值电阻两端电压, y 轴输入为约瑟夫森结两端电压 V_J . 根据定值电阻两端电压和定值电阻的阻值可以

得到流过约瑟夫森结的电流，由此可以画出约瑟夫森结两端电压和流过它的电流的关系图 $V-I$ 曲线。

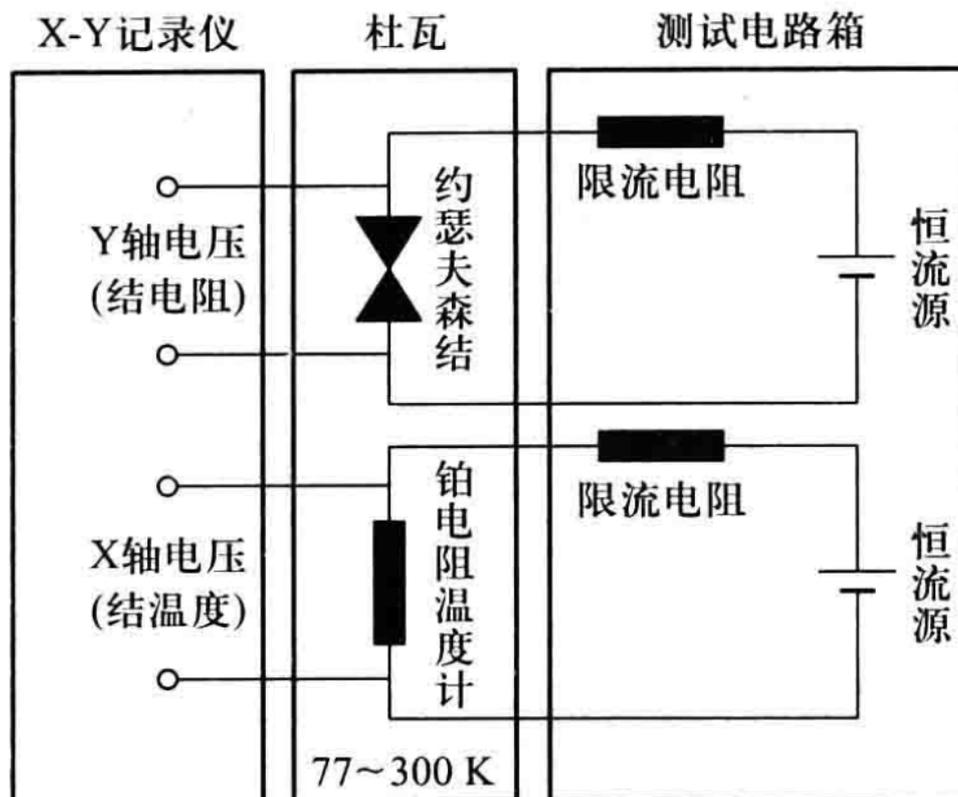


图 3. $R-T$ 曲线测量原理示意图

本实验的测量系统为 $X-Y$ 记录仪。需要注意的是，实验中使用的该器材 y 轴旋钮和接线良好，但 x 轴的细调旋钮损坏，故实验中记录得到的 x 轴分度值并不准确，需要通过其他手段进行校准，具体操作见实验步骤说明。

B. 实验步骤说明

由于本实验中双晶约瑟夫森结能承受的电流较小，测量时为防止过大电流（如静电）损坏样品，在非测量阶段需要把约瑟夫森效应观测仪前面板上的“短路-测量”开关打到“短路”上，准备就绪开始测量时，再把开关打到“测量”状态。

1. 测量双晶约瑟夫森结超导微桥的 $R-T$ 曲线

1. 初始化装置。把待测样品放置于样品杆底部。按照图 3 所示，将 $X-Y$ 记录仪与约瑟夫森效应观测仪后面板的相应接口连接。将约瑟夫森观测仪的“短路-测量”开关打到“短路”位置，“ $R-T$ ”和“ $V-I$ ”开关打在“ $R-T$ ”位置。 $X-Y$ 记录仪的 x 轴和 y 轴开关打到“Zero”位置。把记录仪右下角的“Hold-Release”开

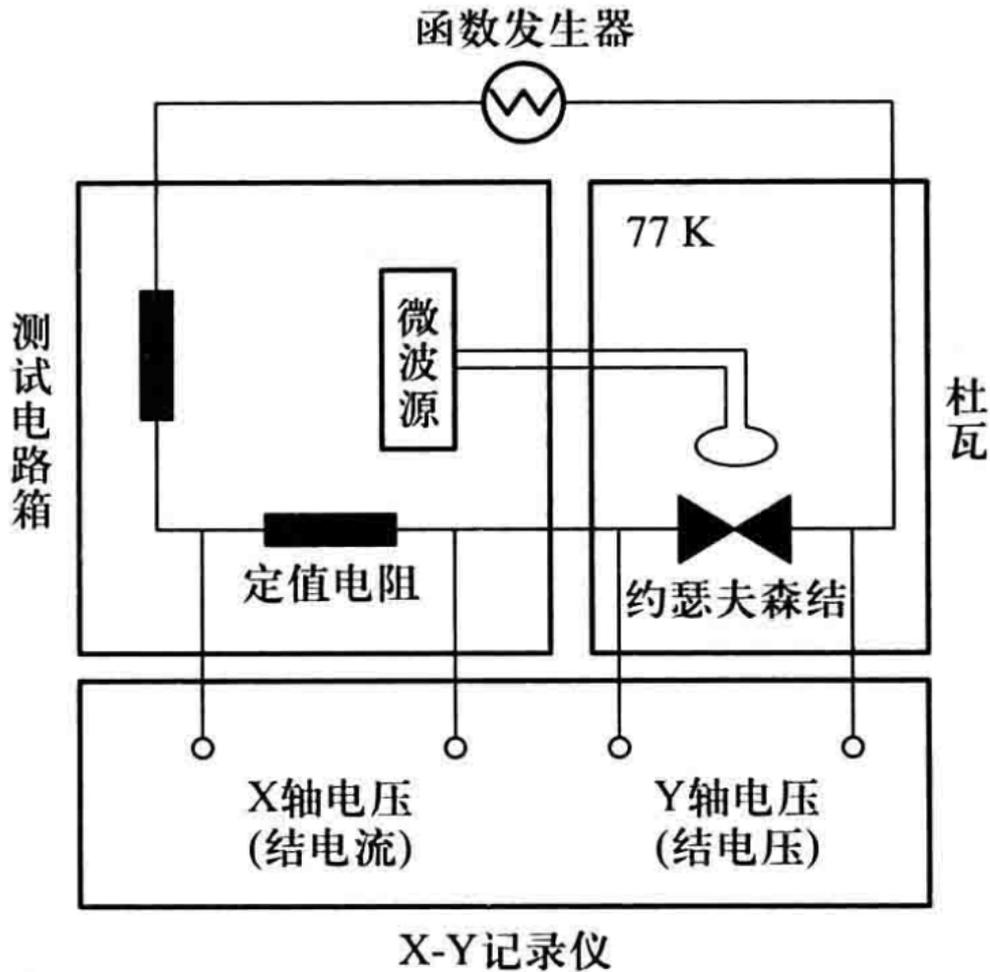


图 4. $V-I$ 曲线测量原理示意图

关和“Up-Down”开关分别置于 Release 和 Up 状态, 将记录纸放到记录仪上, 使记录仪的两个红色指示灯分别在记录纸的同一条水平线上, 从而使得记录纸放正, 并把记录仪面板的“Hold-Release”开关置于 Hold 状态. 调整笔尖位置, 使得笔尖位于记录纸的左下角, 将记录仪的“Up-Down”开关置于“Down”状态, 打出坐标原点. 此后, 若需要移动记录纸, 只需将“Hold-Release”开关置于“Release”状态, 否则置于“Hold”状态; 若需要画图, 只需将“Up-Down”开关置于“Down”状态, 否则置于“Up”状态. 坐标原点最好取格点.

2. 打开约瑟夫森效应观测仪的开关, 将 $X-Y$ 记录仪的 x 轴和 y 轴开关打到“Measure”位置, $X-Y$ 记录仪的笔尖会移动至右上方. 调整 X 和 Y 方向的分度值, 使得笔尖位置不会超出仪器范围, 并尽可能在右上方. 使用万用表测量此时的铂电阻阻值, 从而得到此时的温度.
3. 将样品杆插入液氮罐中, 使样品浸没在液氮中, 此时样品温度下降. 等到记录仪笔尖不再移动时, 取下记录纸, 记录纸上会画出 $V_J - I_T$ 曲线.
4. 结合 x 轴的坐标、 y 轴的坐标和分度值、恒流源输出电流、液氮的温度, 并利用

77K~300K 范围内铂电阻阻值几乎线性变化的物理规律即可得到超导转变点的温度.

2. 在液氮沸点下测量双晶约瑟夫森结的 $V-I$ 曲线

1. 将前面板的“短路”“测量”开关打到“短路”位置,按照图 4所示,将 $X-Y$ 记录仪与约瑟夫森效应观测仪后面板的相应接口连接.把“ $R-T$ ”和“ $V-I$ ”开关打在“ $V-I$ ”位置.放好记录纸,调整好笔尖位置、分度值(本实验采用横坐标分度值为 5mV/cm ,纵坐标分度值为 $10\mu\text{V/cm}$).
2. 打开信号发生器,使其输出频率为低频三角波(本实验使用的是 45mHz),逐渐增大输出电压幅值(本实验使用的是 3.272Vpp),同步调整分度值,直到观测到约瑟夫森临界电流,并画出优美的 $V-I$ 曲线.
3. 重新标定横坐标分度.关闭约瑟夫森效应观测仪的开关,移除其与 $X-Y$ 记录仪的连接线,将一电压源接在记录仪 x 轴输入端,确定坐标原点,调整电压源输出为 1mV 、 2mV 、 3mV 、 4mV 、 5mV ,分别打点.用尺子测量后点和点之间的距离并取平均值即可得到横坐标的分度值.
4. 根据横坐标、横坐标分度和定值电阻阻值即可算出约瑟夫森临界电流.

3. 在液氮沸点下施加微波辐照,测量双晶约瑟夫森结的 $V-I$ 曲线

1. 在上一步实验的基础上,连接微波辐照装置和样品杆并打开微波辐照.
2. 调整微波辐照装置的频率和输出功率, $X-Y$ 记录仪的分度值,观察 $V-I$ 曲线的变化,可以看到较为清晰的夏皮罗台阶.
3. 根据纵坐标值及其分度、台阶个数等可以算出微波频率.将其与仪器展示的频率对比,验证约瑟夫森效应理论的正确性.

III. 结果及讨论

A. 双晶约瑟夫森结超导微桥的 $R-T$ 曲线

实验得到的双晶约瑟夫森结超导微桥的 $V_J - V_T$ 曲线如图 5所示.其中, y 轴分度值为 0.1mV/cm , x 轴显示的分度值为 10mV/cm .

测量得初始测量点的横坐标(距离)为 17.16cm ,超导转变点的横坐标(距离)为 4.22cm ,最终不变点的横坐标(距离)为 3.35cm .室温下用万用表测量得到的铂电阻大小为 109.6Ω ,由此可查表并利用其线性计算得到此时的温度为 297.715K .已知液氮温度为 77K .根据铂电阻阻值和温度的线性关系,可以计算得到转折点的温度约为 90.9K .



图 5. 双晶约瑟夫森结超导微桥的 $R - T$ 曲线

可以发现, 在液氮温度下, 约瑟夫森结两端的电压并不为 0, 而是一恒定的负值. 这可能是由于实验装置所处的温度跨度较大而产生了温差势能, 或是诸如电压测量系统零点漂移等其他实验装置本身原因造成.

B. 在液氮沸点下测量双晶约瑟夫森结的 $V - I$ 曲线

实验得到的液氮沸点下双晶约瑟夫森结的 $V - I$ 曲线如图 6 所示. 其中, y 轴分度值为 $10\mu\text{V}/\text{cm}$, x 轴显示的分度值为 $5\text{mV}/\text{cm}$. 采用外加电压源重新标定 x 轴分度, 得到 x 轴分度为 $7\text{mV}/\text{cm}$.

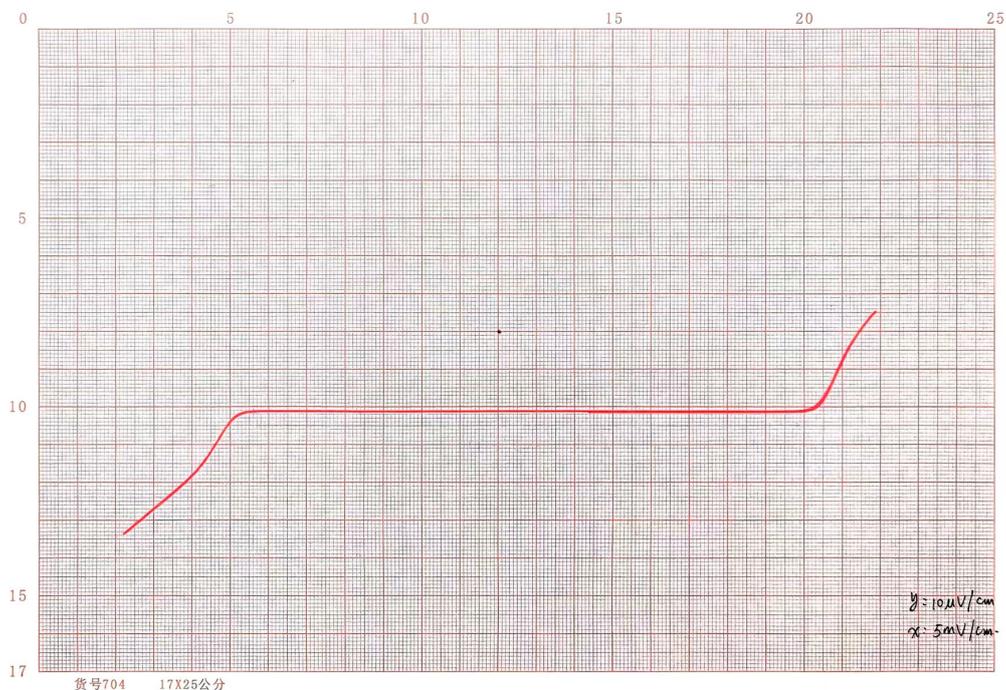


图 6. 双晶约瑟夫森结无微波辐照下的 $V - I$ 曲线

测量得到两个转变点之间距离为 14.31cm , 由此可以计算得到约瑟夫森结的临界电流为 $I_c = \frac{14.31 \times 7}{2 \times 50} = 1.0017\text{mA}$.

当电流大小大于约瑟夫森临界电流时, 约瑟夫森结两端会出现电压差, 这是由于样品内电子发生隧穿导致的.

C. 在液氮沸点下施加微波辐照, 测量双晶约瑟夫森结的 $V - I$ 曲线

实验得到的液氮沸点下双晶约瑟夫森结在微波辐照下的 $V - I$ 曲线如图 7 所示. 其中, y 轴分度值为 $10\mu\text{V}/\text{cm}$, x 轴显示的分度值为 $5\text{mV}/\text{cm}$. 采用外加电压源重新标定 x 轴分度, 得到 x 轴分度为 $7\text{mV}/\text{cm}$. 从图中可以观察到较为明显的夏皮罗台阶. 测量得到各个台阶的高度如表 I 所示.

表 I. 夏皮罗台阶高度与序数的关系

n	-3	-2	-1	0	1	2	3
y/cm	-2.20	1.48	0.72	0	0.71	1.50	2.30
V/ μV	-22.0	-14.8	-7.2	0	7.1	15.0	23.0



图 7. 双晶约瑟夫森结无微波辐照下的 $V - I$ 曲线

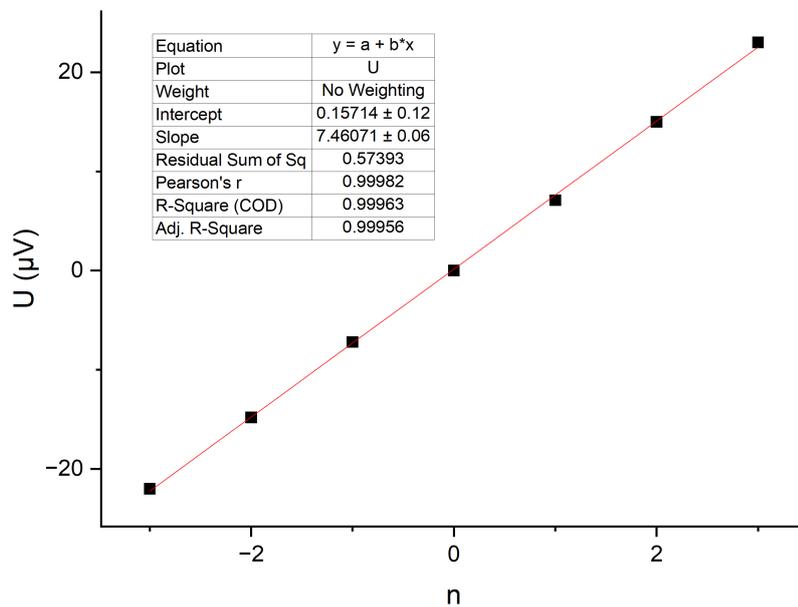


图 8. 夏皮罗台阶高度与序数的关系拟合

使用 Origin 对其作线性拟合, 得到如图 8 直线, 拟合得到的斜率 $k = 7.46017 \mu V$. 已知公式 $V = n \frac{h\nu}{2e}$, 由此得到 $k = \frac{h\nu}{2e}$, 从而可以计算得到微波频率 $\nu = \frac{2ek}{h} = 3.608 GHz$.

但是仪器实际显示的微波频率为 9.129GHz, 与理论计算的相差较大. 这可能是由以下几点原因造成的:

- 实验中记录的 y 轴分度值错误, 实际打到的分度值为 $25\mu V/cm$ 而不是记录的 $10\mu V/cm$. 推测该原因可能性较大, 因为实验中观察到 y 轴旋钮的指示线恰好位于 $10\mu V/cm$ 和 $25\mu V/cm$ 之间, 可能读数有偏差.
- 实验使用的 $X - Y$ 记录仪除了 x 轴分度值损坏外, y 轴分度值也可能存在误差.
- 在测量夏皮罗台阶的高度时, 误把二级台阶认为是一级台阶, 导致测量得到的台阶高度较小. 但是根据图 7 所示, 台阶较为明显, 误记的可能较小.

如果根据第一点原因, 则重新计算得到的微波频率为 9.02GHz , 与仪器显示的 9.129GHz 较为接近, 误差约为 1.2% .

由此可以验证约瑟夫森效应理论的正确性.

如果使用不含双晶结的超导微桥样品进行试验, 理论上记录得到的无微波辐照和有微波辐照的 $V - I$ 曲线都是一条直线, 即不存在约瑟夫森效应. 这是因为对于 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, 其相干长度极小, 无双晶结的样品很难在样品间形成弱耦合, 导致无法产生约瑟夫森效应. 而双晶衬底的约瑟夫森结是由两块平行于衬底表面晶向不同的 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 粘合形成, 可以使得两块超导体间形成弱连接, 产生约瑟夫森效应.

IV. 结论

本实验使用双晶约瑟夫森结样品, 测量了其电阻与温度的关系曲线, 得到了其超导转变温度. 然后, 在液氮温度下, 测量得到了其在无微波辐照下的 $V - I$ 曲线, 并得到了约瑟夫森临界电流. 最后, 给样品加以微波辐照, 测量得到样品的 $V - I$ 曲线, 观察得到了较为明显的夏皮罗台阶, 并由此计算得到了微波频率, 验证了约瑟夫森效应理论的正确性.

致谢

感谢王越老师的耐心指导和帮助.

感谢搭档***同学的协助.

-
- [1] 吴思诚 and 荀坤, 近代物理实验, 第 4 版 ed. (高等教育出版社, 北京, 2015).
 [2] 吴崇试 and 高春媛, 数学物理方法, 第 3 版 ed. (北京大学出版社, 北京, 2019).

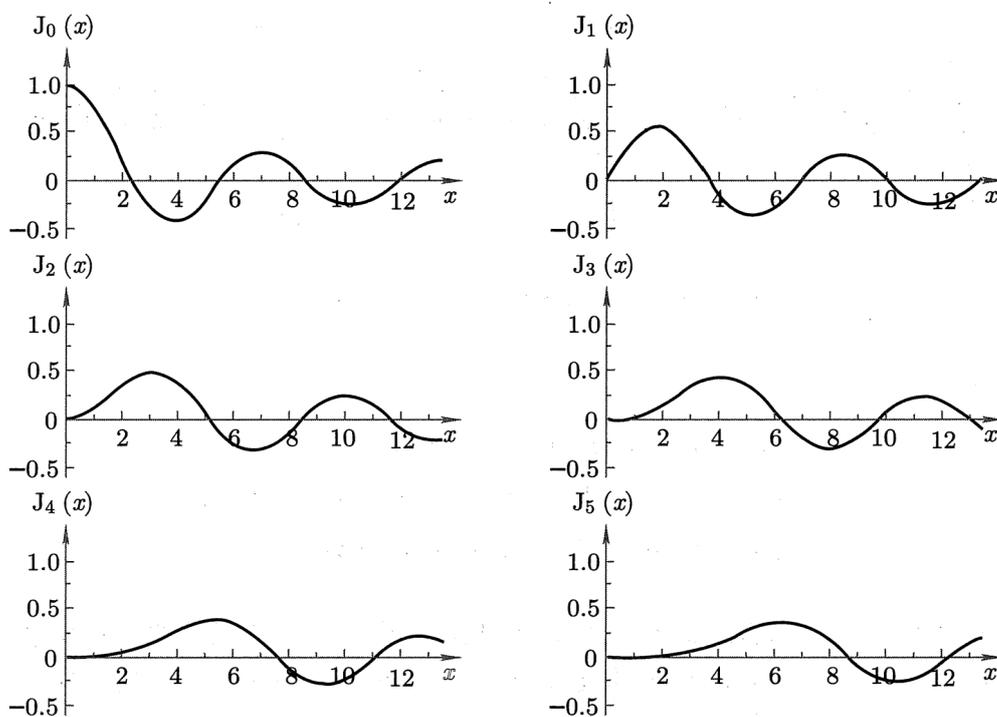


图 9. 自变量为实数时的 Bessel 函数 (摘自 [2])

附录 A: 思考题

1. 在进行 $R-T$ 曲线测量时如何选定坐标记录原点和 $R-T$ 记录仪的分度值以得到合适的测量曲线?

坐标原点尽可能选在左下角的格点上. 在样品温度在室温时, 将 $X-Y$ 记录仪的 x 轴和 y 轴分别调到 Measure 档, 调整 x 轴和 y 轴的分度值, 使得笔的位置尽可能在纸的右上角, 但是又不超出仪器记录范围. 这样做的目的是让记录得到的图像尽可能铺满全纸, 原点在格点方便测量距离.

2. 通过测量 $V-I$ 曲线来考察直流约瑟夫森效应时, $X-Y$ 记录仪轴 (结电压) 的分度值在开始时应该选定在什么挡位? 是应该大还是应该小?

y 轴分度值取值应该尽可能小, x 轴分度值应该要使得横向的图像不能超出纸的范围.

3. 随着微波输出功率的变化, 双晶约瑟夫森结的伏安特性 ($V-I$) 曲线有什么变化? 产生的原因是什么?

$$\text{当 } V = n \frac{h\nu}{2e} \text{ 时, } j(\bar{t}) = (-1)^n j_c J_n\left(\frac{2eu}{h\nu}\right) \sin \phi_0 \propto J_n\left(\frac{2eu}{h\nu}\right).$$

根据图 9 所示, 随着 u 的增大, J_0 的大小先减小后增大, $J_n (n \geq 1)$ 的大小先增大后减小. 即当功率逐渐增大时, 0 级台阶的长度先减小后增大, 其余级别台阶的长度先增大

后减小. 实验中也确实观察到了类似现象.

4. 双晶结超导微桥与不含有双晶结的超导微桥的测量结果有什么差异? 这些差异为什么可从一个侧面证实约瑟夫森效应的观测?

双晶结超导微桥在没有微波辐照时, 当电流超过约瑟夫森临界电流时, 电压不为 0; 在有微波辐照时, 会出现夏皮罗台阶. 而不含有双晶结的超导微桥的电压在测量范围内始终是 0. 得到的约瑟夫森临界电流大小远小于超导临界电流, 可以从侧面证实约瑟夫森效应观测. 夏皮罗台阶的观测也可以反映交流约瑟夫森效应.

5. 为什么说超导是宏观量子现象? 通过此实验, 谈谈你对这个问题的理解.

约瑟夫森效应原理是库珀对的隧穿效应, 这属于量子现象. 但是它可以通过宏观的电流、电压观测得到. 所以是宏观量子现象.

6. 约瑟夫森效应有哪些应用 (你了解或设想的), 这些应用的基本原理是什么?

约瑟夫森效应有诸多应用, 比如绝对电压基准、超导量子比特等. 其中, 绝对电压基准原理是微波感应台阶电压和频率的一一对应关系, 而频率可以被原子钟等精确测量, 因此可以得到基准电压. 超导量子比特的基本原理是约瑟夫森结可等效为一个“超导量子干涉器件”(SQUID), 其核心是“电荷 - 磁通”的量子化特性. 结的超导电流状态 (如电流方向、大小) 对应量子态的不同能级, 可通过外部磁场或电压调控这些量子态, 实现量子比特的“0”和“1”状态。