

谐振型 Josephson 隧道结与外加 微波的磁耦合 (II)

崔广霖 孟小凡 邵 凯

(北京大学物理系)

1982 年 1 月 19 日收到

提 要

本文报道了在微带线上进行的一种对比实验。实验结果证明了把谐振型 Josephson 隧道结安排在微带线上磁场较强处能获得较好的耦合。从而进一步支持了磁耦合的观点。

一、引 言

微带结是运用普通的掩模技术或光刻技术将薄膜超导隧道结和微波集成电路做成一个整体的一种新型 Josephson 器件。目前已受到了广泛的重视^[1,2]。我们对和微带线耦合的谐振型 Josephson 结进行了一些研究。首先的工作就是和波导中的工作一样^[3]，对磁耦合和电耦合进行了比较。所谓磁耦合的观点就是认为外加微波和谐振型结的耦合主要是通过微波磁场进行的。戴远东等^[4]根据受迫振动模型，运用磁耦合的边条件，在零级近似下解 Maxwell-Josephson 方程，求得的场解说明必需把结的中心按排在波导或微带线上磁场最强处，才能获得最好的耦合。我们的实验结果证实了这个结论。

二、微带线路和 Josephson 结

我们所用的微带线路基片是 1.5mm 厚的普通钙玻璃。在 $f = 9.3\text{GHz}$ 时测得相对介电常数 $\epsilon_r = 5.3$ 。介电损耗未作测量，估计约在 10^{-3} 数量级。我们设计的微带线路如图

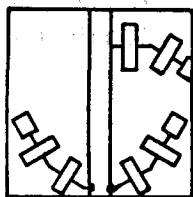


图 1

1 所示 (结区在开路终端附近)。基片尺寸为 $25 \times 25\text{mm}^2$ 。图形中心区为一条特性阻抗 50Ω 的铅膜超导微带传输线。线长约 24mm，终端开路。右上方和 50Ω 传输线相连接的是一个五单元微带半集中元件低通滤波器 (切比雪夫型)。滤波器由高阻线和低阻线相间排列组成。高阻线宽 0.22mm，阻抗约为 130Ω 。用来模拟电感元件。低阻线宽 5.4mm，阻抗约为 30Ω ，用来模拟电容元件。三段高阻线的长度分别为 1.35mm, 2.95mm, 1.35mm。两段低阻线长度均为 2.00mm。滤波器设计要求的截止频率为 $f_1 = 4.9\text{GHz}$ ，在 $f_1 = 8.8\text{GHz}$ 以上有 20dB 以上衰减。通带波纹为 0.01 dB。

滤波器端接一段 50Ω 的传输线, 作为直流引线的焊接点. 图形下方左右两侧各为一个五单元切比雪夫低通滤波器, 其设计和上述滤波器完全相同. 下方的两个滤波器靠近中间的 50Ω 线的一端各有一个 $0.9 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 的小片. 中间的 50Ω 线和右上方的滤波器为一次蒸镀的铅膜, 下方的两个滤波器和头上的小片为另一次蒸镀的铅膜. 两层中间有氧化层. 每个小片和 50Ω 线形成一个长 0.9 mm (沿着 50Ω 微带线的方向) 宽 $0.2-0.3 \text{ mm}$ 的重叠区. 重叠区的两层铅膜加上中间的氧化层构成了 $\text{Pb-PbO}_x\text{-Pb}$ 结. 隧道结工作在 x 波段, 是一个半波长谐振型结. 左右两个结可以独立偏置和作直流测量. 线路中设计这三个低通滤波器的目的是为了把微波线路和直流线路隔离开来. 具体设计步骤可参阅文献 [5].

三、实验装置

1. 杜瓦系统和微波线路

杜瓦系统采用直径 90 mm 的玻璃液氮杜瓦瓶, 外加液氮保护. 外加微波信号用同轴线输入. 由于条件限制, 未能找到德银或不锈钢硬同轴, 我们使用了 SYV-50-2-2 轴同轴线. 这就带来了漏热问题. 为了充分利用冷氮气的冷量, 我们把软同轴的塑料外皮剥掉, 露出外导体. 并在杜瓦瓶中安排了三个挡辐射片. 每个瓶中装入四根软同轴线, 再加上一根穿直流引线用的直径 10 mm 的德银管和一根杜瓦管. 这样的系统每小时由于漏热而蒸发的液氮约 0.7 l . 灌满一次液氮 (约 3.5 l) 能用 4 小时左右. 同轴线上下端均装有高频插头.

2. 微带盒

装置微带线路用的微带样品盒是仿照 Finnegan^[6] 设计的, 如图 2 所示. 微带盒内部尺寸为 $25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 高为 21 mm . 可以同时并排放两片微带基片. 盒子内壁中部有一圈宽 1 mm , 高 0.5 mm 的突台. 两块微带基片被夹紧在这一圈突台和下面两块并排的方形铜块之间. 方形铜块大小为 $25 \times 25 \text{ mm}^2$, 厚度为 10 mm . 它们同时还作为微带线的接地板. 微带盒上下均有铜制屏蔽盖. 盒体四周每边开两个内径 5 mm 圆孔, 周围铣有凹槽, 以便装置微带插座. 使用时可以任意选用八个孔中的一个或多个孔装置微带插座. 其余的用作直流引线穿孔或用铜片封住不用. 实验时, 使微带插座内导体搭接在 50Ω 微带线上, 然后和同轴线终端的高频插头连接, 就可以输入微波信号. 每个杜瓦瓶中可装两个微带盒, 一次实验可测量四个样品.

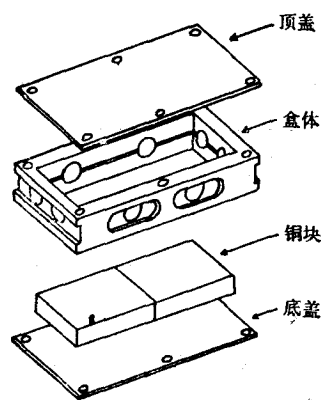


图 2

3. 偏置、测量线路

杜瓦瓶中的直流引线采用直径 0.16 mm 的高强度漆包线. 每个瓶中装十八根. 下端

通过接线板和样品上的直径 0.1mm 的引线相连. 连接方式采用并联式. 即从每片样品右上角的直流引线焊点上引出一对引线. 一根作为电压测量线, 一根作为电流偏置线. 把四个样品上的四根电压线焊到接线板上的一个焊点上, 再把四根电流线焊到另一个焊点上. 在所有样品的其他直流引线焊点上各引出一对电压线和电流线. 每一对线代表一个结, 分别按照结的编号顺序, 接到接线板上相应的焊点上.

杜瓦瓶外的微波线路、测量和偏置线路均与文献 [7] 所述相同.

四、低温实验结果和讨论

我们的低温实验是在 4.2K 温度下进行的. 在实验中首先在示波器上观察结的直流特性. 并用电流表测量结的临界电流 I_c . 然后用 X-Y 函数记录仪记录结的直流 $I-V$ 曲线. 以便由此测出结的正常态电阻 R_n . 直流特性测量结束后就开始加上外加微波信号. 粗略地调节一下输入微波功率, 使结的 $I-V$ 特性曲线上显示出台阶结构. 然后仔细地调节微波频率, 找准结的谐振频率 f . 固定微波源的频率, 逐步加大入射微波功率, 使高度最大的台阶所对应的电压 V_n 尽可能大. 记下这时的 V_n , 以及它对应的台阶高度 ΔI_n , 和入射功率 P_{in} .

在实验中为了对电耦合和磁耦合进行比较, 我们在制结时改变两块掩模板的相对位置, 使结区落在 50 Ω 传输线的不同位置. 我们做了三种不同位置的实验. 第一种是结区落在 50 Ω 微带线开路终端附近. 在这个位置上微带线中的微波电场比较强, 而微波磁场则比较弱. 第二种情况是结区的中心离开路终端约四分之一微带导引波长 (考虑到对开路终端作 0.4—0.5mm 的开路修正). 这时候微带线中的微波电场比较弱而微波磁场比较强. 第三种情况是结区中心离开路终端的距离 (同样也考虑了 0.4—0.5mm 的开路修正) 约为微带中导引波长的二分之一. 在这种情况下微带线中的微波电场应该较强而微波磁场应该较弱. 相应的对比实验的典型结果见表 1.

表 1

结 号	离开路端距离	V_n (mV)	ΔI_n (μ A)	P_{in} (mW)	f (GHz)
8112-PML-3-6	0	1.24	20	150	8.2763
8112-PML-1-1	$1/4\lambda_g$	4.92	150	17	8.0583
8112-PML-2-4	$1/2\lambda_g$	3.19	100	80	8.7339

表 1 中 λ_g 表示微带线中的导引波长.

由表 1 可以看出, 当结区离开路端 $1/4\lambda_g$ 时, 可以用最小的人射功率得到最大的台阶电压 V_n . 这就说明了磁耦合的效果比电耦合要好得多. 为了进一步作比较, 使得结果更为明显, 我们对实验数据作了一些处理. 由表 1 的数据得到的处理结果见表 2.

其中 R_n 为结的正常态电阻. V_m 是耦合到结上的微波电压,

$$V_m = V_n(1 + 1.28N^{-\frac{1}{2}})^{[8]}, \quad (1)$$

其中 N 是电压为 V_n 的台阶的标号

表 2

结 号	离开路端距离	$R_n(\Omega)$	$V_m(\text{mV})$	$A(\Omega)$	$P_i(\text{mW})$	$\eta(\%)$
8112-PML-3-6	0	0.061	1.33	3×10^2	0.0072	0.005
8112-PML-1-1	$1/4 \lambda_g$	0.033	5.06	0.7	0.19	1
8112-PML-2-4	$1/2 \lambda_g$	0.045	3.32	10	0.061	0.08

$$N = \frac{2e}{h} \cdot \frac{V_n}{f}. \quad (2)$$

e 是电子电荷, h 为普朗克常数, f 为入射微波的频率, P_i 为耦合到结上的微波功率. 根据谐振腔的一般理论, 它应等于

$$P_i = \frac{1}{4R_n} V_m^2 [8]. \quad (3)$$

表 2 中 η 为耦合效率

$$\eta = P_i / P_{in}. \quad (4)$$

这是一个直接衡量结的耦合安排好坏的重要判据, 它反映了照到结上的微波功率有多少被结所吸收了. 此外, 表 2 中的 A 是经验公式

$$P_{in} = A \frac{V_n^2 [9]}{R_n^2} \quad (5)$$

中的常数. 如果我们粗略地认为 $V_m \doteq V_n$, 把 (3), (5) 两式代入 (4) 式, 则得到

$$\eta = \frac{R_n}{4A}. \quad (6)$$

所以 A 值实际上反映了 η 中去除了 R_n 因素以后所剩下的其他因素. 经验表明结的正常态电阻 R_n 对于耦合好坏的影响很大. 而同时 R_n 又和结的制作过程有很大关系, 它是一个不易严格控制的量. 所以 A 值本身也是一个判断耦合结构好坏的重要数据. 显然, 对一个结来说, η 是越大越好, A 值是越小越好. 从表 2 中可以看出, 当结离开路端四分之一导引波长时, 其 η 和 A 都比结处于开路端时好出两个数量级以上. 这说明了磁耦合比电耦合更有效.

另外, 我们也曾利用终端短路的方法做过类似的对比实验. 方法是在原来的开路终端加一条宽约 8mm、厚 0.05mm 的薄铜片, 作为一个短路器. 但实验结果表明在以上三种位置上都无法得到较好的耦合, 一般只有 2mV 左右的最大台阶电压. 这种现象的原因可能是由于实现微带短路比较困难. 特别是当短路铜片表面不很平整光滑或铜片与微带接触不很好时, 终端已不再是短路, 而类似于一个吸收负载. 这时微带线上离终端不同距离处场强差别不大, 这就可能导致上述情况的发生.

此外应当指出的是这种比较实验所用的微带线路图形, 在实际使用中并不是最佳方案. 原因很简单. 由图

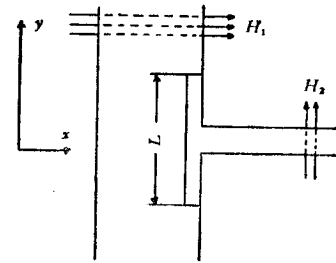


图 3

3 可以看出, 在微带 T 形转接处存在着磁场方向的变化. 由于结区正好落在 T 形转接处, 所以结区的微波磁场必然有一部分是顺着结长 L 的方向的, 即图 3 中的 y 方向. 而这个方

向的微波磁场由于谐振频率不同而很难和结耦合。所以这就大大影响了耦合的效率。要想得到高的耦合效率就必须把结设计在微带线的微波主路中。关于这种实用的结的设计将另行报道。

五、结 论

我们在微带线上所做的对比实验的结果表明,和波导中的情况一样,必须把结按排在传输线的磁场最强处才能获得最好的耦合。这就进一步证实了文献[4]所得到的结果,也就是进一步支持了磁耦合的论点。

同时实验表明,要得到有效的耦合,必须把结设计在微波主路,而不能按排在T形转接处。

朱声传、廖绍彬、赵立群同志曾参加有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. F. Finnegan *et al.*, *Physica B+C(Netherland)*, **94**(1978), 219.
- [2] L. B. Holdeman *et al.*, In AIP Conference proceedings No. 44, Future Trends in Superconductive Electronics (1978), pp. 182—186 (Editors B. S. Deuver *et al.*), (University of Virginia, Charlottesville).
- [3] Cui Guang-ji *et al.*, Experimental Results of the Magnetic Coupling, (SQUID's80) p. 763 (Editors H. D. Hahlbohm, H. Lübbig).
- [4] Dai Yuan-dong *et al.*, The Coupling between Josephson Junction and Applied Microwave (XV International Congress of Refrigeration Paper Ays-14).
- [5] 顾其铮等, 微波集成电路设计, 人民邮电出版社, (1978).
- [6] T. F. Finnegan, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **13**(1980), 49.
- [7] 崔广霁等, 本刊本期.
- [8] P. Somervuo *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **46**(1975), 1415.
- [9] M. Koyanagi *et al.*, 同文献 [2], p. 187.

MAGNETIC COUPLING BETWEEN THE RESONANT JOSEPHSON TUNNEL JUNCTION AND THE APPLIED MICROWAVE (II)

CUI GUANG-JI MENG XIAO-FAN SHAO KAI

(Department of Physics, Peking University)

ABSTRACT

This paper reports a series of controlled experiments carried out on the microstripline. The result of the experiments showed, when the resonant Josephson tunnel junction was placed there, where the magnetic field on the stripline was stronger, the coupling would be better. Thus the point of view of the magnetic coupling is further confirmed.