

高温超导台阶结 YBCO dc-SQUID 一阶平面梯度计

韩 冰 陈赓华 徐凤枝 赵士平 杨乾声

(中国科学院物理研究所,凝聚态物理中心,北京 100080)

(1999 年 12 月 6 日收到)

在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ SrTiO₃ (STO) 台阶衬底上用单层 YBa₂Cu₃O_{7- δ} (YBCO) 薄膜制备了 dc-SQUID 一阶平面梯度计, 探测环面积约为 33 mm^2 , 基线长度 $d = 4.5\text{ mm}$. 该梯度计在无屏蔽条件下对地磁场有较好的屏蔽作用, 共模抑制比为 1.4×10^2 , 磁场梯度灵敏度为 $8\text{ PT/cm} \sqrt{\text{Hz}}$ (白噪声区).

关键词: 台阶结, SQUID, 平面梯度计

PACC: 7450, 7475, 7490

1 引 言

SQUID 梯度计是超导电子学一个重要的应用. 由于它仅仅对磁场的梯度敏感, 而外界环境的干扰(地磁场的波动, 周围车辆的移动, 50 Hz 市电及其谐波等)往往可看作远场(均匀场), 因此, 梯度计可有效屏蔽外界环境的干扰, 显示了很大的优越性.

对于传统的低温 SQUID 磁场梯度计, 通常用低温超导导线绕制成两个大小相等, 方向相反的探测线圈, 然后通过输入线圈与 SQUID 耦合^[1]. 但对于高温超导材料来说, 制备低 $1/f$ 噪声的细线材还不成熟, 无法用传统的方法来解决耦合问题. 高温 SQUID 磁场梯度计通常有两种: 一种是通过高温超导薄膜形成两个大小相等, 方向相反的探测环, 构成平面 SQUID 磁场梯度计^[2-7]. 另一种是将两上分开一定距离的磁强计的输出相减, 构成电子梯度计^[8-12]. 这种梯度计调平衡比较困难. 由于高温超导 dc-SQUID 平面梯度计的基线长度(两个探测环中心之间的距离)受到基片尺寸的限制, 灵敏度较电子梯度计低, 在灵敏度要求很高的生物磁测量中, 通常采用电子梯度计. 但是在灵敏度要求不是很高的无损探伤(NDE)中, 平面梯度计得到了实际的应用.

2 平面梯度计的制备

我们采用台阶晶界结制备了单层 YBCO 一阶

平面梯度计. 首先在 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ STO 基片上, 以 Nb 作掩膜, 用能量为 500 eV, 束流密度为 $250\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ 的 Ar⁺ 束刻蚀出倾角大于 60° , 上下沿平整一致的基片台阶¹⁾, 台阶的高度为 290 nm. 然后用高压在轴磁控溅射的方法, 在台阶衬底上外延厚度为 250 nm 的 YBCO 薄膜, 并在其上淀积约 100 nm 厚的 Ag 膜作为电极, YBCO 薄膜的零电压超导转变温度 $T_{c0} > 89\text{ K}$, 临界电流密度 $J_c > 10^6\text{ A/cm}^2$. 最后, 用传统的光刻工艺和 Ar⁺ 束刻蚀的方法形成所需要的梯度计图形. 在 YBCO 薄膜刻蚀过程中, 样品被放置在水冷台上, 每刻 3 min 停 3 min, 以保证薄膜在刻蚀过程中不因温度过高而失氧.

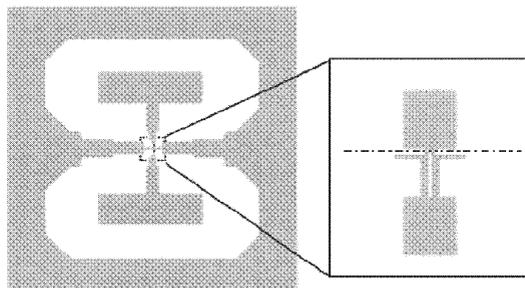


图 1 一阶平面梯度计的图形, 右边方框是被放大的中心 dc-SQUID 部分, 点划线表示沿台阶方向

梯度计由一个位于中心的 dc-SQUID 和与它直接耦合的两个对称的薄膜探测环组成, 如图 1 所示. 组成 SQUID 的 YBCO 带长 $60\text{ }\mu\text{m}$, 宽 $10\text{ }\mu\text{m}$, 其中 SQUID 环孔尺寸为 $75\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$, 这种细长狭缝形

1) 王晶等 私人通讯.

状可使两个探测环的差值电流更有效地在 SQUID 环孔中产生磁通. 台阶结长 $10\ \mu\text{m}$, 宽 $3\ \mu\text{m}$, 为了保证两个结的一致性, 将它们尽量靠近, 其距离为 $5\ \mu\text{m}$. 细长狭缝的电感 $L_{s1} = 0.48a + 1.7b$ (pH)^[13] = $45\ \text{pH}$ 其中 a 和 b 分别为狭缝的长和宽, 结的电感^[14] $L_j = 9\ \text{pH}$. 再考虑到运动学电感部分^[15] $L_{s1}^{(k)} = 6\ \text{pH}$, $L_j^{(k)} = 4\ \text{pH}$, 可得 SQUID 电感 $L = L_{s1} + L_{s1}^{(k)} + L_j + L_j^{(k)} = 64\ \text{pH}$. 梯度计的基线长度受基片尺寸的限制, 大约为 $4.5\ \text{mm}$. 每个探测环的面积约为 $33\ \text{mm}^2$. 为了尽可能减小由于电流密度过大而产生的 $1/f$ 噪声, 探测环跨台阶部分较宽, 约 $4.7\ \text{mm}$, 其余部分的线宽约为 $1\ \text{mm}$.

3 实验结果

在 $77\ \text{K}$ 温度下, 我们对所制备的 SQUID 平面梯度计的 I - V 特性曲线、 V - Φ 特性曲线、共模抑制比、噪声频谱作了测试和研究, 得到了较合理的结果.

图 2 是该平面梯度计中 SQUID 的电流电压特性, 其临界电流 $I_c \approx 10\ \mu\text{A}$, 正常态电阻 $R_n = 4.1\ \Omega$, 给出其乘积 $V_c = I_c R_n = 41\ \mu\text{V}$, 屏蔽参量 $\beta = \frac{I_c L}{\Phi_0} = 0.31$, 在温度 $T = 77\ \text{K}$ 时, 由^[16]

$$\Delta V = \frac{4}{\pi} \frac{I_0 R_n}{1 + \beta} \left[1 - 3.57 \frac{\sqrt{k_B T L}}{\Phi_0} \right]$$

可以得到器件输出电压的峰峰值应为 $22\ \mu\text{V}$.

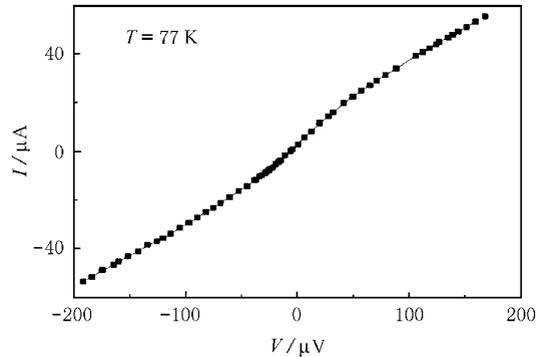
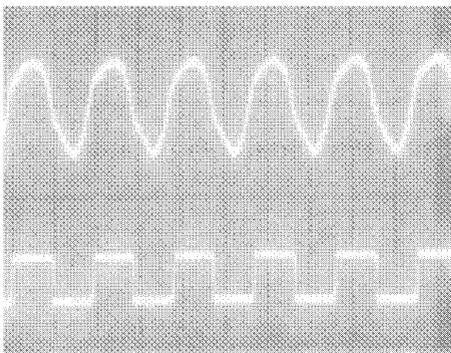
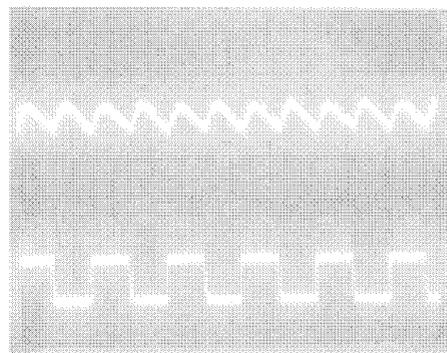


图 2 平面梯度计的 I - V 特性曲线

在无任何屏蔽的条件下, 梯度计能稳定地工作, 对实际应用具有重要意义. 在我们实验室环境中, 梯度计在 $50\ \text{kHz}$ 磁通调制下的开环输出波形如图 3 (a) 所示. 其信号峰峰值 $V_{p-p} \approx 11.8\ \mu\text{V}$. 比理论值 $22\ \mu\text{V}$ 小很多, 可能是由两个结的临界电流不对称引起. 该梯度计能在地磁场下稳定地工作, 图 3 (b) 给出了磁通锁定情况下器件输出的倍频信号.



(a)



(b)

图 3 无屏蔽条件下, 平面梯度计的 (a) 开环输出和 (b) 闭环输出波形, 图中下面的波形为 $50\ \text{kHz}$ 调制波形

共模抑制比 (common mode rejection factor) 是表征梯度计的一个比较重要的参量, 定义为梯度计对梯度场的响应与对均匀场的响应的比值, 它直接给出梯度计对均匀场的抑制能力. 我们对共模抑制比的测定如下, 在磁通锁定情况下, 首先在地磁场的背景下一个梯度线圈建立梯度场, 当梯度场改变 $160\ \text{nT/cm}$ 时 (相当于将一个探测环置于零磁场,

另一个探测环置于 $72.3\ \text{nT}$ 的均匀场), 在 SQUID 上测量到一个量子磁通 Φ_0 的改变, 即梯度磁通转换系数 $B_\Phi = 160\ \text{nT/cm} \Phi_0$. 接着将梯度计置于 Helmholtz 线圈的均匀场中, 发现在响应最灵敏 (磁场垂直于梯度计平面) 的方向上, 每改变 $10.3\ \mu\text{T}$ 在 SQUID 环孔中引起一个 Φ_0 的磁通变化. 由此可以得出器件的共模抑制比为 $10.3\ \mu\text{T}/72.8\ \text{nT} = 1.4 \times 10^2$.

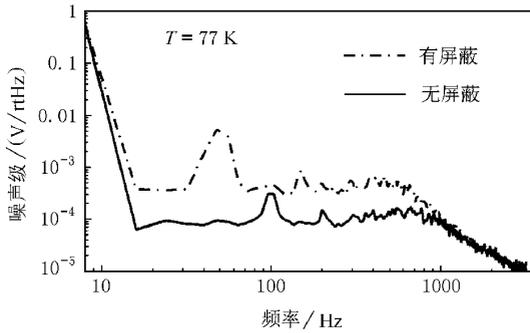


图 4 平面梯度计的噪声谱 虚线和实线分别在无屏蔽和有屏蔽 ($< 1 \text{ nT}$) 条件下测得, 系统带宽为 1 kHz

表征梯度计的另一个重要参量是磁场梯度灵敏度. 在磁通锁定情况下, 我们从仪器输出端测出有屏蔽和无屏蔽条件下的电压噪声分别为 $80 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $380 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$, 如图 4 所示. 测量到仪器输出端电压磁通转换系数为 $5.76 \text{ V}/\Phi_0$ 和梯度磁通转换系数为 $160 \text{ nT}/\text{cm}\Phi_0$, 得到磁场梯度灵敏度分别为 $2.27 \text{ pT}/\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}$ (有屏蔽) 和 $8.1 \text{ pT}/\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}$ (无屏蔽). 可以看出, 平面梯度计对均匀场和 50 Hz 市电都有较好的抑制作用. 在白噪声区无屏蔽条件下器件的电压噪声是有屏蔽条件下噪声的 4 倍, 而 50 Hz 增加了近两个量级, 这主要来自于周围用电设备的干扰.

容易得到梯度计的有效面积 $A_{\text{eff}} = 1/(d \cdot B_{\Phi}) = 0.03 \text{ mm}^2$. 表 1 给出了梯度计的主要参数.

表 1 平面梯度计主要参数的测量值

有效面积 A_{eff}	基线长度 d	梯度 灵敏度	共模 抑制比	梯度磁通 转换系数
0.03 mm^2	4.5 mm	$2.2 \text{ pT}/\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}$	1.4×10^2	$160 \text{ nT}/\text{cm}\Phi_0$

4 讨 论

我们制备了工作于地磁场下的 YBCO 台阶结 dc-SQUID 一阶平面梯度计. 梯度计的有效面积 $A_{\text{eff}} = A_s + k(A_p/L_p)L \approx k(A_p/L_p)L$, 其中 A_s 为 SQUID 的有效面积, A_p, L_p 分别为探测环的有效面积和电感, k 为耦合常数, L 为 SQUID 电感. 为了提高有效面积, 应尽可能增大 k , 即增大两个探测环的差值电流所能感受到的电感与 SQUID 电感的

比. 另外, SQUID 电感与探测环的电感严重失配以及基片尺寸小, 是平面梯度计有效面积从而磁场梯度灵敏度还不够高(目前, 最好的达到了 $500 \text{ fT}/\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}$ ^[17])的主要原因. 对探测环作最佳设计和进一步提高耦合系数 k , 梯度灵敏度有望得到较大的提高.

- [1] J. E. Zimmerman, *J. Appl. Phys.* **42** (1971), 4483.
- [2] M. B. Ketchen, W. M. Goubau, J. Clarke, G. B. Donaldson, *Appl. Phys.* **49** (1978), 1327.
- [3] V. Zakosarenko, K. H. Berthel, K. Blüthner, P. Seidel, P. Weber, *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994), 779.
- [4] N. M. Keene, J. S. Stachell, S. W. Goodyear, R. G. Humphreys, J. A. Edwards, N. G. Chew, K. Lander, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995), 2923.
- [5] V. Schultze, R. Stolz, R. Ijsselsteijn, V. Zakosarenko, L. Fritsch, F. Thrum, E. Ilichev, H. G. Meyer, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997), 3473.
- [6] R. Schmidl, S. Wunderlich, L. Dorrer, H. Specht, S. Linzen, H. Schneidewind, P. Seidel, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997), 2756.
- [7] E. Dantsker, O. Froehlich, S. Tanaka, K. Kouznetsov, J. Clarke, Z. Lu, V. Matijasevic, K. Char, *Appl. Phys. Lett.* **71** (1997), 1712.
- [8] Y. Tavrín, Y. Zhang, M. Mück, A. I. Braginski, C. Heiden, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1993), 2477.
- [9] Y. Tavrín, Y. Zhang, W. Wolf, A. I. Braginski, *Supercond. Sci. Technol.* **7** (1994), 265.
- [10] J. Borgmann, P. David, G. Ockenfuß, R. Otto, J. Schubert, W. Zander, A. I. Braginski, *Rev. Sci. Instrum.* **68** (1997), 2730.
- [11] B. David, O. Dossel, V. Doormann, R. Eckart, W. Hoppe, J. Krüger, H. Laudan, G. Rabe, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997), 3267.
- [12] H. J. M. ter Brake, R. Karunanithi, H. J. Holland, J. Floktra, D. Veldhuis, L. Vargas, J. W. M. Hilgenkamp, W. Jaszczuk, N. Janssen, F. J. G. Roesthuis, H. Rogalla, *J. Low Temp. Phys.* **37** (1997), 397.
- [13] H. Fuke, K. Saitoh, T. Utagawa, Y. Enomoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996), L1582.
- [14] K. C. Gupta, Ramesh Garg, I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines* (Artech House, Dedham, MA, 1979), p. 263—265.
- [15] R. Meservey and P. M. Tedrow, *J. Appl. Phys.* **40** (1996), 2028.
- [16] K. Enpuku, Y. Shimomura, T. Kisu, *J. Appl. Phys.* **73** (1993), 7929.
- [17] D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, J. Clarke, *Rev. Mod. Phys.* **71** (1999), 631.

YBCO STEP-EDGE JUNCTION DC-SQUID PLANAR GRADIOMETER

HAN BING CHEN GENG-HUA XU FENG-ZHI ZHAO SHI-PING YANG QIAN-SHENG

(*Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 6 December 1999)

ABSTRACT

A dc-SQUID planar gradiometer has been fabricated with $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ step-edge Josephson junctions on a $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ single crystal SrTiO_3 [100] substrate. The gradiometer has a pair of pickup loops with an area of 33 mm^2 and the baseline of 4.5 mm . The system operates well in unshielded environment. A rejection of common mode fields of 1.4×10^2 in all directions and a field gradient sensitivity (white noise) better than $8\text{ pT/cm} \sqrt{\text{Hz}}$ at 77 K have been achieved.

Keywords : step-edge junction, SQUID, planar gradiometer

PACC : 7450, 7475, 7490