

利用 Nernst 效应的高 T_c 超导红外探测器分析*

李世祥

宋洪法

(国防科技大学 长沙 410073)

(机电部十六所 合肥 230061)

摘要 高 T_c 超导膜中 Nernst 效应的存在为研制辐射探测器开辟了新的途径。本文分析了以 Nernst 效应为基础的高 T_c 超导红外探测器的工作原理及有关的噪声源。

关键词 高 T_c 超导膜, Nernst 效应, 磁通涡旋线钉扎, 热力, 磁感应力

分类号 O511.2

用高 T_c 超导膜制成宽波段辐射探测器是其最有前途的应用之一。这类探测器的原理各不相同^[1]而从实验观察到高 T_c 超导膜中 Nernst 效应的存在为研制新型辐射探测器, 包括红外探测器提供了条件。本文将着重讨论该类探测器的工作原理及有关的噪声因素。

1 探测器的原理

图1表示一超导膜置于 xoy 平面内, 膜厚沿 z 方向。在 x 正方向施加外磁场 \vec{H} , 且膜内因吸收辐射能而沿 z 方向出现温度梯度 ∇T 。则此时在膜沿 y 轴的两侧面上将出现电位差, 这种现象称 Nernst 效应^[2], 该电位差称 Nernst 电压。为了讨论方便, 下面先分析薄膜只受外磁场 \vec{H} 作用而膜内无温度梯度 ∇T , 即不受外来辐射照射的情况。

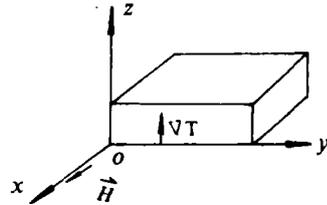


图1

在无辐照的情况下, 让外加磁场 \vec{H} 的大小满足 $H_{c2} > H > H_{c1}$ 时, 高 T_c 超导膜将处于混合态, (其中 H_{c2}, H_{c1} 分别为超导膜的上, 下临界磁场。) 且膜内磁通涡旋线的分布是不均匀的, 即

$$\vec{B}(\vec{r}) = n(\vec{r})\phi_0\vec{i} = n(\vec{r})\vec{\phi}_0 \quad (1)$$

式中 \vec{r} 为矢径, $n(\vec{r})$ 为膜内磁通涡旋线的密度, $\vec{\phi}_0$ 为磁通量子, 其大小

$$\phi_0 = \frac{h}{2q} = 2.07 \times 10^{-15} \text{ (韦伯)} \quad (2)$$

膜内同时存在感应电流密度 \vec{J}_s ,

$$\vec{J}_s = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \frac{\phi_0}{\mu_0} \nabla \times n(\vec{r})\vec{i} \quad (3)$$

于是单位长度磁通涡旋线受到的驱动力为

* 1993年12月24日收稿

$$\vec{j} = \vec{J} \times \vec{\phi}_0 \quad (4)$$

式中 \vec{J} 表示其他磁通涡旋线的涡旋状超导电流在该磁通线芯子附近所形成的总电流密度。这样单位体积中磁通格子所受到的驱动力 \vec{F}_D 为

$$\vec{F}_D = n(\vec{r})\vec{j} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (5)$$

磁通格子在驱动力作用下理应运动，但由于高 T_c 超导膜内存在大量钉扎中心（它是由超导膜形成过程中因热处理，掺杂等造成的一系列缺陷所产生）使磁通格子受到钉扎力 \vec{F}_p 的阻尼作用。当 $|\vec{F}_p| \geq |\vec{F}_D|$ 时，在膜温 $T_f \neq 0K$ 的情况下，磁通格子将只会缓慢的蠕动。由

$$\vec{E}(t) = -\vec{v}_B \times \vec{B} \quad (6)$$

可知，蠕动的磁通涡旋线将感应出电场，(6) 式中 \vec{v}_B 代表磁通涡旋线蠕动的瞬时速度， \vec{v}_B 在平行于 $yoze$ 的平面内。于是高 T_c 膜在 Y 方向的两侧之间会出现波动的电压。对于辐射探测来说这是由于磁通线蠕动带来的噪声电压 V_n 。

$$V_n = A\gamma_0 e^{-(u_p \pm f_D \cdot x)/KT} \quad (7)$$

上式说明噪声电压 V_n 正比于磁通线蠕动频率， u_p 表示钉扎势阱的深度， x 表示钉扎势阱的宽度，“+”、“-”符号取决于磁通涡旋线蠕动方向。A、 γ_0 均为常数。

2 辐射照射的情况

下面讨论有辐射照射的情况。设外来红外辐射沿负 z 方向照射到超导膜上，使膜内出现沿正 z 方向的温度梯度 ∇T ，从而在几种力的作用下，将促使磁通涡旋线产生粘滞性流动见图 2。

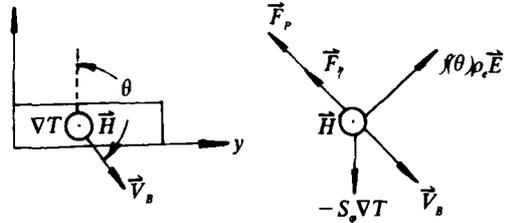


图 2

设磁通涡旋线运动速度为 \vec{v}_B ，其方向与 z 轴相交成 Hall 角 θ ，于是所有影响磁通线运动的力满足下述方程^[3]

$$-S_s \nabla T - f(\theta)n_s e (\vec{v}_B \times \vec{\phi}_0) - \eta \vec{v}_B - \vec{F}_p = 0 \quad (8)$$

式中， S_s 为转移熵， n_s 是超导载流子浓度， $f(\theta)$ 为 θ 有关的参数， η 是等效粘滞系数。

(8) 式两边乘磁通线密度 n ，得

$$-S_s n \nabla T - f(\theta)\rho_c (\vec{v}_B \times \vec{B}) - \eta n \vec{v}_B - \vec{F}_p = 0 \quad (9)$$

式中， $-S_s n \nabla T$ 为单位体积内磁通格子所受到的热力， $-f(\theta)\rho_c (\vec{v}_B \times \vec{B})$ 为磁感应力； $-\eta n \vec{v}_B = \vec{F}_v$ 为粘滞力； \vec{F}_p 为钉扎力。

利用 $\vec{E} = -(\vec{v}_B \times \vec{B}) = -\nabla u$ 代入上式可分解得到

$$\begin{cases} -S_s n \nabla T - f(\theta)\rho_c \frac{\partial u}{\partial z} - \eta \frac{n}{B} \frac{\partial u}{\partial y} - F_{pz} = 0 \\ -f(\theta)\rho_c \frac{\partial u}{\partial y} + \eta \frac{n}{B} \frac{\partial u}{\partial z} - F_{py} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

由此可得

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{(F_{pz} + S_s \nabla T n) \eta \frac{n}{B} - f(\theta)\rho_c F_{py}}{-\eta^2 n^2 / B^2 - f^2(\theta)\rho_c^2}$$

假设 \vec{F}_p 沿 z 轴方向, 则上式可变为

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\frac{\eta n}{B} S_\sharp \left[\frac{F_p}{S_\sharp} + n \nabla T \right]}{-\eta^2 n^2 / B^2 - f^2(\theta) \rho_c^2} \quad (11)$$

令 $\frac{F_p}{S_\sharp} = -(\nabla T)_c$, 则 Nernst 电场可表示为

$$E_{ner} = -\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\frac{\eta n}{B} S_\sharp [n \nabla T - \nabla T_c]}{\eta^2 n^2 / B^2 + f^2(\theta) \rho_c^2} \quad (12)$$

其中转移熵 S_\sharp 对于高 T_c 超导膜可表示成

$$S_\sharp = [1 + (K_n - K_s) / (K_n + K_s)] S_c \quad (13)$$

式中 K_n, K_s 分别是膜在正常相和超导相时的热导率, S_c 是磁通涡旋线线芯处的熵。于是

$$E_{ner} = \frac{\frac{\eta n}{B} [1 + (K_n - K_s) / (K_n + K_s)] S_c [n \nabla T - \nabla T_c]}{\eta^2 n^2 / B^2 + f^2(\theta) \rho_c^2} \quad (14)$$

让 E_{ner} 沿 y 方向积分就可得到 Nernst 电压。利用它可测量引起膜内温度梯度 ∇T 的外辐射功率。

3 噪声因素

在利用 Nernst 效应探测红外辐射的同时, 在超导膜中还会出现其他一系列效应, 其中有一些效应就成为利用 Nernst 效应的红外探测器的噪声因素。

首先是 Seebeck 效应引起的噪声。在图 2 所示的磁通涡旋线的运动中沿 z 轴方向超导薄膜两侧面上产生的电位差是 Seebeck 效应引起的电压, 其值可从 (10) 式得到

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{f(\theta) \rho_c S_\sharp \left(\frac{F_{pz}}{S_\sharp} + n \nabla T \right)}{-\eta^2 n^2 / B^2 - f^2(\theta) \rho_c^2}$$

于是 Seebeck 效应电场

$$E_{see} = \frac{f(\theta) \rho_c S_\sharp [n \nabla T - \nabla T_c]}{\eta^2 \frac{n^2}{B^2} + f^2(\theta) \rho_c^2} \quad (15)$$

其中 $\nabla T_c = -F_{pz} / S_\sharp$, 可能作为上述红外探测器的另一个噪声源是 Ettinghusen 效应。当上述超导膜在 y 方向产生电场 $E_y = -(\nabla u)_y$ 后, 则 z 方向将产生附加的温度梯度 $(\nabla T)_z$, 这种现象称 Ettinghusen 效应。该附加温度梯度 $(\nabla T)_z$ 的出现将干扰 Nernst 电压。 $(\nabla T)_z$ 的大小由下式计算:

$$(\nabla T)_z = C \cdot \frac{T}{K_s} \frac{S_\sharp}{\phi_0} (\nabla u)_y \quad (16)$$

式中, K_s 为超导膜处于超导相时的热导率; ϕ_0 为磁通量子; T 为超导膜初始温度。

逆交流 Josephson 效应产生的电压^[1]也是上述超导红外探测器的噪声因素。

由于高 T_c 超导膜可以看成由大量线度为 um 量级的颗粒组成。在超导状态下整个膜可看作上述小颗粒之间的弱连结的随机网络, 当有外来辐照时, 单个结上将出现由逆交流 Josephson 效应感生的直流电压 V_{dc} , 当 $\omega \ll (RC)^{-1}$ 时。

$$V_{dc} = I_c R J_0 \left[\frac{2eI_{ac}R}{\eta\omega} \right] \cdot \text{Sin} \left[\phi_0 + \frac{2eI_{ac}R}{\eta\omega} \right] \quad (17)$$

式中, R 为等效结电阻; $J_0 [x]$ 为第一类零阶 Besser 函数。 ϕ_0 : $\tau = \frac{t2eI_{ac}R}{\eta} = 0$ 时, 超导结左右两边的宏观波函数位相差。

对于高阻结, 可近似得到

$$V_{dc} \sim n \frac{\eta\omega}{2e} \quad (18)$$

式中 n 为正负整数和零。由于热涨落, 单个结上的逆交流 Josephson 效应引起的电压很小, 而整个膜中大量结上的电压的积累就相当可观, 即使没有完整的超导通路, 这种电压的积累过程也存在。它对 Nernst 效应产生的电压的测量造成干扰。

除了上述几种噪声因素之外, 利用 Nernst 效应的高 T_c 超导探测器还存在一种特有产生噪声的机制即当入射辐射能足够大时, 膜的局部地方最高温度 T 可能超过临界温度 T_c 而转入正常相使信号迅速减弱, 输出波形出现了尖峰, 形成失真或干扰。

利用 Nernst 效应研制高 T_c 超导红外探测器从探测机理上是一种新的探索, 这种探测器在响应度, 响应时间和响应波段宽度等都会是十分优越的。国外已有研制这类红外探测器的报导⁽²⁾。

参 考 文 献

- 1 李世祥, 宋洪法。低温与超导。1993, 21 (1): 21~27
- 2 H Lengfellner, A Schnellogl, J Betz, K Renk and W prette. International Journal of Infrared and Millimeter Wevs, 1990, 11 (5): 631~639
- 3 R P Huebener. Magnetic Flux Structures in Super conductors, Springer Series in Solid-State Sciences 6, eds. M. Cardona, P. Fulde, and H. J. Queisser, Berlin, 1979: 154

Analysis of High T_c Infrared Superconducting Detector with Nernst Effect

Li Shixang

(Department of Applied Physics)

Song Hongfa

(The 16th Institute of the Mech. and Elect. Industry Ministry)

Abstract

The Nernst effect in a high T_c Superconducting thin film presents a new way of developing infrared detector. In this paper, the principle of high T_c superconducting infrared detector with Nernst effect is analysed and several noise sources is discussed.

Key words high T_c superconducting thin film, Nernst effect, flux pinning, thermal force, magnetic induction force