

铁磁自旋波对介观环中持续电流的影响^{*}

II . Peierls 失稳中 magnon 的作用

吴深尚

(中山大学物理学系, 广州 510275)

摘 要 研究在 Texture 结构中自旋波的量子涨落 (magnon) 对具有 Peierls 失稳性的介观环持续电流的影响, 结果表明由于能隙的出现而使持续电流进一步的减少.

关键词 介观环, Peierls 失稳, 声子, magnon, 持续电流

分类号 O 413. 3

在文 [1] 中我们曾讨论了 Loss 系统中 Texture 产生的 FSW 的量子涨落对介观环上持续电流的影响. 最近, 通以一定磁通的介观环中电子由于受到晶格振动的影响而产生 Peierls 失稳的问题受到注意^[2,3]. 实验和理论都指出一维或准一维的金属或导电聚合物由于存在电子-声子的作用, 在一定的温度下因电子吸收 (或发射) $Q=2K_F$ 的声子而使系统出现 Peierls 相变^[4]. 发生 Peierls 相变的材料将由金属态进入绝缘态. Nathanson 等人指出在介观环中如果考虑电声子作用, 介观环可能出现 Peierls 失稳^[2]. 其平均场近似下的结果定性表明: 当环上的原胞数 N 较小时, Peierls 相变温度 T_P 是磁通的周期函数, 而在大 N 条件下, T_P 与磁通无关. 另一方面, 当介观环进入 Peierls 失稳态时, 持续电流依然是磁通的周期函数, 不过电流的振幅衰减了几个数量级. 至于绝缘态的介观环中仍然存在持续电流则可能是由于处于 CDW 态, 瞬子对原胞之间的势垒穿透产生持续电流^[3].

本文讨论 Loss 系统中介观环产生 Peierls 失稳及 Texture 存在 FSW 的量子涨落对 Peierls 失稳后持续电流的影响. 我们讨论受 magnon 作用的电子与声子耦合使晶格软化后介观环中持续电流的行为, 分析 magnon 对持续电流的影响.

1 Peierls 失稳态的持续电流

文 [1] 中, 我们将 Loss 系统视为具有铁磁性的 Texture 结构和置于其中的介观金属环. Texture 系统的磁场 $\hat{B}(\theta)$ 除了改变电子的跳跃动能之外 (hopping energy), 对电子在原胞的能量也有所改变. 这时电子的能量本征值为

$$X_n = 2J \cos \left[\frac{2c}{N} \left(n - \frac{h}{h_0} \right) \right] \pm e_{-B} B$$

其中 h_0 为磁通量子. Texture 中的 FSW 涨落使电子经历一个吸收和发射 magnon 的虚过程, 结果使电子的能量变为

^{*} 中山大学高等学术研究中心资助项目
收稿日期: 1995-10-19 吴深尚, 男, 50岁, 副教授

$$X_k = 2J e^{-W_m} \cos\left[\frac{2c}{N}\left(n - \frac{h}{h_0}\right)\right] - e_{-B} B$$

此外,文 [1] 中,我们还证明子 Loss 系统的介观环电子系统可以由一维紧束缚模型来描述. 为了便于讨论 Peierls 失稳问题,我们转换到动量空间进行讨论,并且考虑在低温及较强的磁场条件下,这时介观环的电子系统处于铁磁自旋有序态. 哈密顿量为

$$H = H_e + H_{ph} + H_i \quad (1a)$$

$$H_e = \sum_k \left[2J e^{-W_m} \cos\left(ka - \frac{2c}{N} \frac{h}{h_0}\right) + e_{-B} B \right] C_k^\dagger C_k \equiv \sum_k (X_k + X_0) C_k^\dagger C_k \quad (1b)$$

其中 $X_k = e_{-B} B$, X_0 为波尔磁子, $X_k = 2J e^{-W_m} \cos\left(ka - \frac{2c}{N} \frac{h}{h_0}\right)$.

$$H_{ph} = \sum_p \hbar k_p (a_p^\dagger a_p + \frac{1}{2}) \quad (1c)$$

$$H_i = -\frac{1}{N} \sum_{kp} M_p (C_{k+p}^\dagger C_k a_p + C_k^\dagger C_{k-p} a_p) \quad (1d)$$

式 (1b) 是电子哈密顿量, (1c) 式是声子哈密顿量, (1d) 式是电声子耦合哈密顿量, 其耦合系数为 M_p . 在这里已经考虑了 magnon 的作用.

在电子能带近半满填充的条件下,受磁场作用的电子费米面的嵌套条件 (nesting condition) 为:

$$X_{k+Q} X_{k-Q} = 2 e_{-B} B$$

这里 $Q = 2k_F$. 当体系温度低于 T_p 时,电声子作用将使 $Q = 2k_F$ 的声子模软化,大数波矢为 Q 的声子凝聚使声子数算符 $\hat{N} = a_Q^\dagger a_Q$ 等于一个宏观期望值即 $\langle a_Q^\dagger a_Q \rangle = N_0$. 这在物理上对应于晶格的失稳. 我们用期望值 (平均声子数) N_0 近似代替算子 a_Q^\dagger, a_Q 即 $\langle a_Q^\dagger \rangle = \langle a_Q \rangle =$

N_0 , 得到 Peierls 失稳的介观环中电子系统的哈密顿量:

$$H = 2N\hbar k_Q + \sum_K \left[(X_{k+Q/2} + X_0) C_{k+Q/2}^\dagger C_{k+Q/2} + (X_{k-Q/2} + X_0) C_{k-Q/2}^\dagger C_{k-Q/2} \right. \\ \left. + \Delta_Q (C_{k+Q/2}^\dagger C_{k-Q/2} + C_{k-Q/2}^\dagger C_{k+Q/2}) \right] \quad (2)$$

其中 $|k| < Q/2, \Delta_Q = N_0 / N M_Q$ 是序参量. 利用传统的正则变换将 (2) 式对角化, 得到对角化形式的哈密顿量

$$H = 2N\hbar k_Q + \sum_K E_k d_k^\dagger d_k \quad (3a)$$

$$E_k = e_{-B} B \pm \sqrt{(X_k - e_{-B} B)^2 + \Delta_Q^2} \quad (3b)$$

这里 E_k 是 Peierls 失稳后电子的能谱. (3b) 式表明 Peierls 失稳在电子原有的费米面附近打开一个能隙. 为了求出介观环的持续电流, 我们先直接计算出电子系统的自由能

$$F = \frac{2N\hbar k_Q}{M_Q^2} \Delta_Q^2 - \frac{1}{V} \sum_k \ln \{ 1 + \exp[-U(e_{-B} B + \sqrt{(X_k - e_{-B} B)^2 + \Delta_Q^2})] \} - \\ - \frac{1}{V} \sum_k \ln \{ 1 + \exp[-U(e_{-B} B - \sqrt{(X_k - e_{-B} B)^2 + \Delta_Q^2})] \} \quad (4)$$

利用公式 $\partial F / \partial \Delta = 0$, 得到能隙方程

$$(4N\hbar k_Q / M_Q^2) \Delta_Q = \sum_k \left(\Delta_Q / \sqrt{(X_k - e_{-B} B)^2 + \Delta_Q^2} \right) \cdot f(\sinh, \cosh) \quad (5a)$$

$$f(\sinh, \cosh) = \frac{\sinh(\sqrt{(\tilde{X}_k - \beta B)^2 + \Delta_Q^2})}{\cosh(\beta B) + \cosh(\sqrt{(\tilde{X}_k - \beta B)^2 + \Delta_Q^2})} \quad (5b)$$

令 $\Delta_Q \rightarrow 0$, 则可以由 (5) 式求出确定 Peierls 相变温度的方程.

在有限温度下, 介观环的总持续电流由熟知的公式^[5]

$$I(h, T) = -C \frac{\partial F}{\partial h} = -C \left[\frac{\partial F}{\partial \tilde{X}_k} \frac{\partial \tilde{X}_k}{\partial h} + \frac{\partial F}{\partial \Delta_k} \frac{\partial \Delta_k}{\partial h} \right] \quad (6)$$

给出. 由 (4) 式给出的自由能以及 (6) 式求出介观环的总持续电流为

$$I(h, T) = \sum_{-K_F}^{K_F} I_k \left[\frac{(\tilde{X}_k - \beta B)}{(\tilde{X}_k - \beta B)^2 + \Delta_Q^2} \right] \cdot f(\sinh, \cosh) \quad (7a)$$

$$f(\sinh, \cosh) = \frac{\sinh(\sqrt{(\tilde{X}_k - \beta B)^2 + \Delta_Q^2})}{\cosh(\beta B) + \cosh[\sqrt{(\tilde{X}_k - \beta B)^2 + \Delta_Q^2}]} \quad (7b)$$

$$I_k = -2J e^{-W_m} \sin(ka - \frac{2c}{N} \frac{h}{h_0}) \quad (8)$$

由 (7) (8) 式知介观环出现 Peierls 失稳之后, 持续电流除了因 magnon 的影响而使电流振幅指数变减之外, 还受到一个衰减函数 $f(\sinh, \cosh)$ 的影响. 当 $\Delta_Q \rightarrow 0$ 时, 由 (7a) 式直接得到在导电态下持续电流的一般表达式:

$$I_{h,T} = \sum_K I_k f(\tilde{X}_k + \beta B) \quad (9)$$

上式中 $f(\tilde{X}_k + \beta B)$ 是能量为 $\tilde{X}_k + \beta B$ 的电子的费米分布函数.

2 结果与讨论

我们在 Loss 系统的介观金属环中引入声子以讨论 Peierls 失稳问题. 由于介观环受到 Texture 磁场的影响, 因此在所讨论的铁磁自旋有序态下, 费米面的折迭条件变为 $\tilde{X}_k + \tilde{X}_{k+Q} = 2\beta B$. 一个明显的结果是能隙 Δ_Q 将受 Texture 磁场的影响, (5) 式的能隙方程将给出一定温度下能隙与磁通的关系.

在 Peierls 失稳前, 电子受到 magnon 的散射产生虚过程减少了电流的幅度. 在发生 Peierls 失稳之后, 激发到能隙上的能带的电子数将变得很少, 所以电流进一步的变弱.

考虑 Peierls 失稳时大多数声子凝聚在动量 $Q = 2K_F$ 的态上, 因此对声子作平均场近似是合理的. 但是, 一旦讨论温度 $T > T_p$ 的正常态时, 我们必须讨论所有的声子态的作用. 这并不是困难, 因为声子与 magnon 同样都是玻色子. 不过, 这已是另外讨论的问题.

中山大学高等学术中心马中水博士为本工作与作者进行多次有益的讨论, 衷心感谢马博士的真诚帮助.

参 考 文 献

- 1 吴深尚. 铁磁自旋波对 Texture 介观环中持续电流的影响(I). 中山大学学报(自然科学版), 1996, 35(3): 51
- 2 Nathanson B, Wohlman O E, Mühlischlegel B. Peierls instability in a mesoscopic ring threaded by a magnetic flux. Phys Rev B, 1992, 45: 3499
- 3 Bogachev E N, Krivel I V, Kulik I O, et al. Aharonov-Bohm effect in insulators with a charge-

density wave. Sov Phys. JETP, 1990, 70: 336

4 Isihara A. Condensed Matter Physics Ch. 5 Oxford University Press, 1991

5 Cheung H F, Gefen Y, Riedel Eberhard K, et al. Persistent currents in small one-dimensional metal rings. Phys Rev B. 1988, 37: 6050

Influence of Ferromagnetic Spin-Wave on the Persistent Currents in the Texture Mesoscopic Ring — Influence of Magnon on the Peierls Instability

Wu Shenshang^{*}

Abstract The persistent currents with consideration of both magnon and phonon interactions in a one-dimensional tight-binding mesoscopic ring is discussed. It is shown that the appearance of Peierls transition will change the metal into insulator and the texture magnetic field strength will decrease the transition temperature.

Keywords mesoscopic ring, persistent currents, ferromagnetic spin-wave, Peierls instability

· 简 讯 ·

《云开变质地块的地质特征与演化》一书出版

该书由我校地球科学系丘元禧教授等编著,中山大学学报编辑部编辑出版,全书约 12 万字,图版 26 幅。

该书是专门为 30 届国际地质大会地质考察而编写的地质指南,主要内容包括云开大山的沿革,区域地质特征,地质演化历史,最有意义或热点的地质研究课题,考察路线上最主要、最关键的地质露头,并介绍有关学者的主要研究成果和论点,有争议的地质问题及近期研究工作进展,并附有云开地区研究工作的主要文献目录,可使读者在较短时间内把握住云开大山区域地质的总体面貌及基础地质研究中存在的有争议的主要地质问题。

(兰)

^{*} Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275