

磁各向异性热电效应对自旋相关器件的影响*

陈家洛 狄国庆†

(薄膜材料江苏省重点实验室, 苏州大学物理科学与技术学院, 苏州 215006)

(2012 年 2 月 27 日收到; 2012 年 4 月 14 日收到修改稿)

在纳米点接触热电效应的实验中检测到“T”形 Ni 线两端的温差电压在外磁场作用下有较大变化, 确认了这是由 Ni 线的磁各向异性热电效应引起的, 外磁场的作用总是在逆温度梯度的方向产生一个额外的电动势, 它与磁场以及 Ni 线两端温度差之间有清晰的对应关系. 实验结果提示, 自旋相关效应器件的研究需要留意器件样品的磁性材料构形设计和测试方法, 以避免混入额外的电磁信号, 给实验结果带来误判.

关键词: 热电效应, 磁各向异性, Ni 线

PACS: 72.15.Jf, 75.30.Gw, 44.10.+i

1 引言

近年来, 随着自旋电子学的发展, 人们将电子自旋与传统的温差电现象结合起来, 对微纳尺寸范围内铁磁性材料中的电子自旋、电荷以及热量输运进行了一系列研究^[1-5], 发现了自旋 Seebeck 效应^[2,5], 继而触发了对自旋阀中自旋相关热电效应的研究^[6,7]. 因为这些样品都是以薄膜的状态和复杂的几何构形制备在硅片衬底上的, 当热场、电场和磁场等同时施加在样品上时, 测试结果很可能是多种物理效应的综合作用, 容易引起误判. Adachi 等^[8]和 Huang 等^[9]最近就相继指出在自旋 Seebeck 效应的测试中, 样品所用的衬底有严重的干扰作用. 而几乎同时, 我们在纳米点接触热电效应的实验中也发现对折成“T”形的 Ni 线施加温度梯度时, 其两端的热电压表现出明显的磁场相关性, 经确认它是源于磁各向异性的热电效应. 它的电压数值接近甚至大于已经报道的自旋相关效应, 说明样品上电极的构形效应可能掩盖所检测的自旋 Seebeck 效应. 这提示自旋相关效应器件的研究需要在设计制作相关的器件样品时引起足够的重视.

2 实验方法

实验装置如图 1 所示. 将一根直径为 200 μm 的 Ni 线折成 90° 直角, 成“T”形, 固定于玻璃基片上, 两端用 Cu 电极连接一纳伏表. F 点为 Ni 线的折角点, E, G 为 Ni 线与 Cu 电极接触区域靠近 F 的点, $EF = 10 \text{ mm}$, $GF = 5 \text{ mm}$. 一块圆柱形磁铁为实验提供外磁场, 磁铁截面直径为 25 mm, 高 20 mm. 施加磁场时, 磁铁的轴线与 Ni 线保持在同一平面, 并且通过 F 点. 磁场的方向定义为磁铁轴线与 EF 的夹角, 磁场强度的大小由磁铁端面与 F 点的距离 r 决定, 见表 1 (表 1 中 1 Oe = 79.5775 A/m).

表 1 磁铁轴心线上的磁场强度与磁铁端面距离的关系

r/mm	45	34	20	15
H/Oe	100	200	600	1000

我们采用 Cu 质的内热式电烙铁作为热源, 给 Ni 线提供温度梯度. 为保证温度的稳定性, 电烙铁由稳压电源供电, 通过调节电烙铁的工作电压改变电烙铁的温度. 由于内热式电烙铁的发热芯在烙铁内部, 烙铁的铜质尖端可以获得比较均匀的温度. 因此, 这种加热方式虽然简单, 烙铁直接接触 Ni

* 江苏省高校自然科学重大基础研究项目 (批准号: 05KJA43006) 资助的课题.

† E-mail: gqdi@suda.edu.cn

线而不会使样品环境包括衬底的温度比 Ni 线的温度更高. 从热量的传递路径来看, 烙铁的尖端直径为 1.5 mm, 它接触直径 200 μm 的 Ni 线上 F 点后, 可给 Ni 线的截面整体提供一个比较均匀的温度, 在沿 Ni 线轴向形成一个方向性比较好的温度梯度. 纳伏表数值稳定后, 我们将磁铁依次加在图 1 中的 90° , 45° , 0° 位置, 观察回路电压的变化, 磁铁在每个位置的停留时间均为 20 s. 改变磁场方向时, 保持 r 不变, 即保持 F 点的磁场强度大小不变.

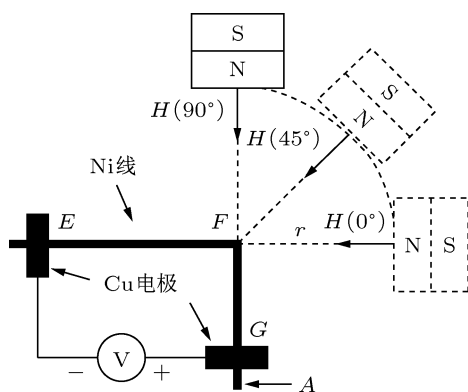


图 1 “T”形 Ni 线的实验装置示意图

3 实验结果与分析

实验结果如图 2 所示. 图 2 中横轴为时间轴, 其中每 20 s 磁场改变一次, 纵轴为纳伏表所检测到的电压.

烙铁尖端温度为 405.7 K 时, 压在 F 点达到热平衡时, E 点温度为 293.8 K, 仅比室温 291.0 K 高出 2.8 K. 因此, 我们可以在实验过程中将 E 点温度看成室温.

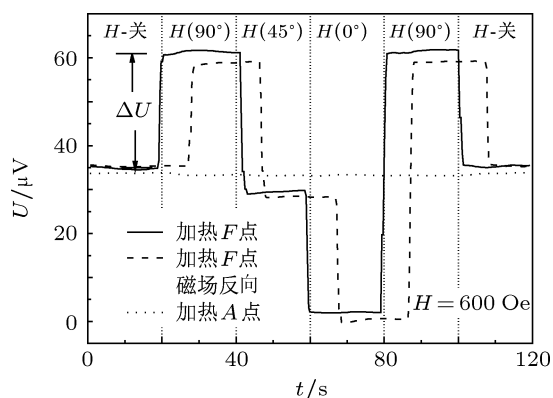


图 2 不同磁场方向和加热条件下“T”形 Ni 线两端电压随外磁场的变化情况

图 2 中实线为将烙铁垂直压于图 1 中 Ni 线上的 F 点, 热平衡后, 改变磁场所得到的纳伏表电压

随时间变化情况. 可以发现外磁场对回路电压有较大影响.

同样的温度条件下, 我们将磁场反向, 得到虚线所示的测量结果, 可以发现回路电压的变化趋势与实线一致.

点线为将烙铁垂直压于图 1 中 Ni 线上的 A 点, 采用与实线同样的测量方法得到的, 可以发现回路电压始终保持不变.

3.1 磁场相关温差电压的定性分析

当用电烙铁给 Ni 线 F 点加热时, 热量沿着 FE , FG 方向扩散, 达到平衡时, 在 FE 段和 FG 段中分别存在一个温度梯度, 产生一定的温差电动势, 此即为汤姆孙电动势. 温度差越大, 汤姆孙电动势越大. 若 E , G 两点的温度相等, 那么 FE 段和 FG 段的温度差相等, 所产生的汤姆孙电动势将相互抵消. 为了比较清楚地显示所发现的现象是在通常的温差电现象的基础上的变化, 在实验过程中, 我们有意地使 FG 的长度段小于 FE 段, 热平衡时的 G 点温度要略高于 E 点温度, G , E 两点就产生了一个很小的温度差. 这样, 在回路上就能在加热时间 $t = 0-20$ s 之间测到一个 35 μV 的本底电压, 此时 Ni 线未处于磁场中, 即磁场的状态为 H -关, 如图 2 中实线所示. 随后将一强度为 600 Oe 的磁场施加在 Ni 线上, 面向 F 点的磁铁端面为 N 极. 20 s 时将磁场加在 90° 的方向, 纳伏表检测到一个明显的电压变化 ΔU , ΔU 达到了 26 μV ; 40 s 时, 磁场转到 45° 方向, $\Delta U = -6 \mu\text{V}$; 60 s 时, 磁场转到 0° 方向, $\Delta U = -32 \mu\text{V}$; 80 s 时, 磁场转回到 90° 的方向, 电压也回到了之前 90° 时的状态; 100—120 s 撤去磁场, 电压又回到了起初 0—20 s 之间 H -关时的状态.

在与实线相同的加热条件下, 我们将磁铁转向, 使磁铁 S 极正对着 F 点, 那么电路中各点的磁场方向都改变了 180° , 如图 2 中虚线所示. 所测到的回路电压变化情况与实线完全相同, 这就说明磁场对回路电压的影响并不是由能斯特效应^[10]造成. 因为若回路中电压的变化是能斯特效应引起, 那么当改变磁场方向 180° 时回路的电压变化情况应与实线相反.

我们注意到, 将烙铁尖端垂直压于 F 点时, 在 F 点将产生一个垂直于 Ni 线平面的温度梯度, 而磁场施加在 Ni 线平面内, 这就有可能在 Ni 线的

轴向产生一个能斯特电场, 形成一定的电动势. 为此, 我们将烙铁水平放置, 烙铁平推至尖端与 F 点接触, 使 F 点 Ni 线上的温度梯度保持在 Ni 线平面内, 如果能斯特效应对回路电压的变化有贡献, 那么此时在 Ni 线所在平面内施加磁场, 所产生的能斯特电场应该垂直于 Ni 线平面, 回路电压将不会随磁场变化. 但我们仍然检测到了与图 2 中实线同样的电压变化. 这说明, 所发现的现象与本实验中施加温度梯度的方式无关, 进一步排除了能斯特效应的可能性, 只能是其他物理因素引起的.

在用烙铁给 F 点加热时, 除了在 Ni 线上产生汤姆孙电动势, 还在 E 和 G 两接触处产生帕尔贴电动势. 我们知道, 两个 Cu, Ni 接触处的帕尔贴电动势也只与 G, E 两点的温度差有关, 所以在无磁场时的回路电压也只与 G, E 两点的温度差有关. 我们将电烙铁垂直压于 Ni 线上如图 1 所示的 A 点, 调节电烙铁工作电压, 热平衡时, 纳伏表所检测到的电压为 $34 \mu\text{V}$, 与热源在 F 点时的 $35 \mu\text{V}$ 相近. 这样就保证了 G, E 两点的温度差几乎相等, 也就是 G, E 两点间的汤姆孙电动势和帕尔贴电动势与热源在 F 点的时候几乎相等, 不同的只是 Ni 线上的温度分布. 此时, 对磁铁做同样的操作, 发现回路电压基本保持不变, 也就是 $\Delta U = 0$, 如图 2 中点线所示. 因此, 图 2 中实线和虚线的实验现象也不是两个接触电极引起的.

根据以上讨论, 我们认为 ΔU 是由温度梯度场和磁场共同作用下 Ni 线中所产生的, 也就是磁场会使温度梯度方向产生一个额外电压. Bakker 等^[6]在研究非局域自旋阀器件时, 正是测量“T”形结构的样品在拐角处存在高温时两端电压对于磁场的依赖, 该“T”形结构中存在着一段坡莫合金, 虽然他们的样品是在微纳米尺寸范围内, 但他们讨论时仍然使用了块材的热电系数. 所以我们的结果说明在他们那样的器件样品结构和测试方法中, 在检测信号中很容易混入一个额外的电压, 遮盖真实的自旋相关效应.

3.2 磁场相关温差电压的来源分析

为了确认 FE 段和 FG 段在磁场作用下电势差的变化原因, 我们将“T”形 Ni 线改为“一”形 Ni 线, 如图 3 所示, 其中 EF 段长度约为 10 mm . 将温度恒定的电烙铁垂直压于 Ni 线上的 A 点, 使 FE 段产生一个温度梯度, 通过施加不同方向和

大小的磁场来观测回路电压的变化情况. 为了得到磁场相关温差电压 ΔU 和 F, E 之间的温度差 ΔT 之间的关系, 我们利用 Seebeck 电动势的计算公式来计算 F, E 之间的温度差 ΔT :

$$\Delta T = \frac{U}{S_{\text{Cu}} - S_{\text{Ni}}}, \quad (1)$$

其中 U 为 Seebeck 电动势, 也就是纳伏表所检测到的电压; $S_{\text{Cu}}, S_{\text{Ni}}$ 分别为 Cu 和 Ni 的 Seebeck 系数, 取 300 K 时的 Seebeck 系数值, $S_{\text{Cu}} = 1.83 \mu\text{V/K}$, $S_{\text{Ni}} = -19.5 \mu\text{V/K}$ ^[11].

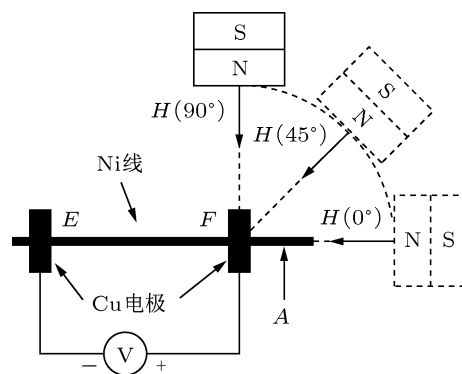


图 3 “一”形 Ni 线的实验装置示意图

如图 4 所示, 我们得到了磁场垂直和平行于 Ni 线时 ΔU - ΔT 关系曲线. 从图 4 中可以看出, ΔU 与 ΔT 成线性关系, 且不论磁场的方向如何, ΔU 都为负值, 也就是在逆着温度梯度的方向产生一个额外的电动势.

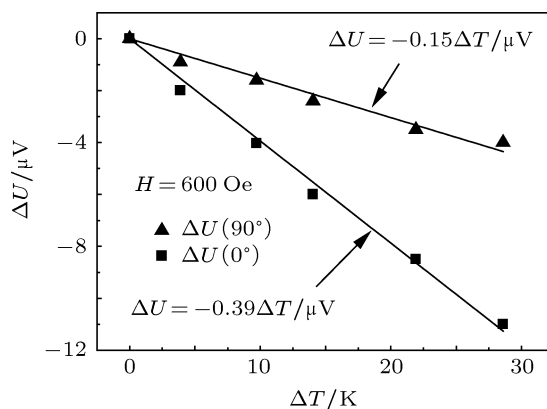


图 4 $H = 600 \text{ Oe}$, 磁场在 90° 和 0° 方向时的 ΔU - ΔT 关系

图 5 为 F, E 之间的温度差一定时, 磁场相关温差电压随磁场的变化关系. 图 5 中可以看出, 在垂直于和平行于 Ni 线方向 ΔU 都随着 H 的变大而趋于饱和. 其中, 磁场平行于 Ni 线时, ΔU 在 H 较

小时已基本达到饱和, 而磁场垂直于 Ni 线时, ΔU 随 H 的变化比较缓慢. 为此我们联系到 Ni 线的磁各向异性, 根据 Ni 线的磁化强度方向来讨论磁场与 ΔU 的变化关系.

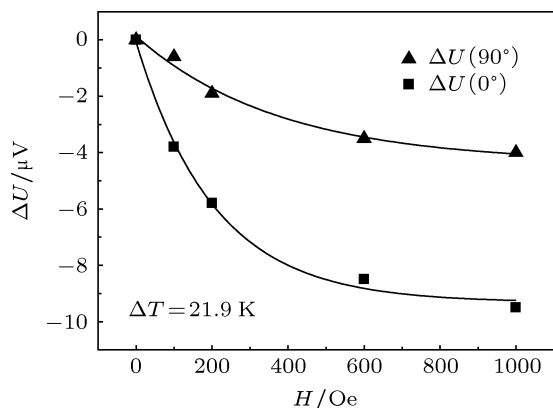


图 5 $\Delta T = 21.9$ K 时, 磁场在 90° 和 0° 方向时 ΔU - H 关系

图 6 为外磁场平行于 Ni 线以及垂直于 Ni 线的磁滞回线图, 在 Ni 线平行于外磁场时, 磁场强度达到 600 Oe, Ni 线基本已经达到饱和磁化, 如图中垂直虚线所示. 而当 Ni 线垂直于外磁场时, 则出现了难磁化曲线, 直到磁场强度达到 4 kOe 时, Ni 线才达到饱和磁化状态.

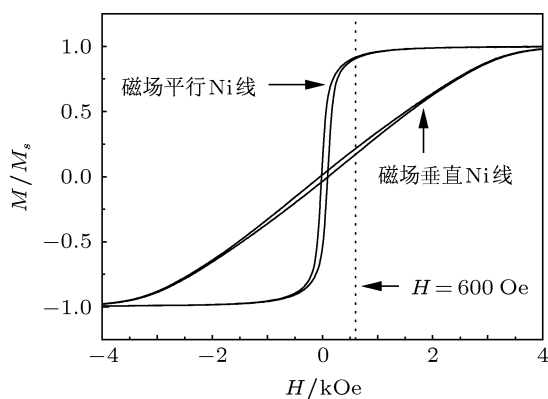


图 6 外磁场平行和垂直于 Ni 线方向时 Ni 线的磁滞回线

联系图 5 与图 6 可以看出, Ni 线的磁化强度越大, 温差电压变化越大. 我们将 (1) 式变形, 得到温差电压的表达式

$$U = (S_{\text{Cu}} - S_{\text{Ni}}) \Delta T. \quad (2)$$

由于本实验中 Ni 线的热导率不受外磁场影响^[12], Ni 线上的温度分布在外磁场下并不发生改变, 所以我们认为 Ni 线的 Seebeck 系数 S_{Ni} 随着镍线的磁化而变大, 从而导致纳伏表所检测到的电压 U 的变小.

文献 [13—15] 根据自由电子模型得出了 Seebeck 系数的表达式

$$S = -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \frac{\partial \ln \rho}{\partial E} \Big|_{E=E_F}, \quad (3)$$

其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为材料的温度, e 为元电荷量, ρ 为材料的电阻率, E 为电子的能量, E_F 为 Fermi 能级. 说明热电系数大小与电阻存在反比关系、都取决于 Fermi 面附近电子的状态密度. 即对于宏观尺寸的 Ni 线, 可以通过施加外磁场来改变 Fermi 能级附近的 $\partial \ln \rho / \partial E$ ^[16], 产生通常所说的磁电阻现象^[17] 和 S 随磁化方向的变化. 从产生的机理上, 它们与磁各向异性和磁致伸缩现象一样, 都可被追溯到同一的自旋之间的相互作用能^[18]. 因此, 在具有磁各向异性的 Ni 线上也能够观察到 Seebeck 系数 S_{Ni} 随磁化方向的明显变化.

通过以上分析表明, 在磁各向异性的 Ni 线上会表现出热电效应对 Ni 线磁化强度和方向的依赖. 因此, 我们实验结果给出了一个提示, 就是在研究自旋相关效应器件样品的制备中, 需要留意其中磁性材料的构形结构设计和器件性能的测试方法, 避免由此混入额外的电磁信号, 才能获得真实可靠的结果.

4 结 论

在纳米点接触热电效应研究的实验中检测到“T”形 Ni 线两端的温差电压在磁场作用下有较大变化, 进一步的实验确认这是由 Ni 线的磁各向异性热电效应引起的. 这个效应在“T”形 Ni 线上能起磁控热电偶的作用, 在检测回路中产生一个总是逆着温度梯度的方向额外的电动势 ΔU . 这个实验结果提示我们, 在自旋相关效应器件样品的制备中, 需要特别留意其中磁性材料的构形结构设计和器件性能的测试方法, 避免由此混入额外的电磁信号, 才能保证自旋相关热电等效应结果的可靠性.

- [1] Zutic I, Fabian J, Sarma S D 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
- [2] Uchida K, Takahashi S, Harii K, Ieda J, Oshibae W, Ando K, Maekawa S, Saitoh E 2008 *Nature* **455** 778
- [3] Uchida K, Xiao J, Adachi H, Ohe J, Takahashi S, Ieda J, Ota T, Kajiwara Y, Umezawa H, Kawai H, Bauer G E W, Maekawa S, Saitoh E 2010 *Nat. Mater.* **9** 894
- [4] Slachter A, Bakker F L, Adam J P, van Wees B J 2010 *Nat. Phys.* **6** 879
- [5] Uchida K, Adachi H, Ota T, Nakayama H, Maekawa S, Saitoh E 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 172505
- [6] Bakker F L, Slachter A, Adam J P, van Wees B J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136601
- [7] Slachter A, Bakker F L, van Wees B J 2011 *Phys. Rev. B* **84** 020412
- [8] Adachi H, Uchida K, Saitoh E, Ohe J, Takahashi S, Maekawa S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 252506
- [9] Huang S Y, Wang W G, Lee S F, Kwo J, Chien C L 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 216604
- [10] Callen H B 1948 *Phys. Rev.* **73** 1349
- [11] Burkov A T, Vedernikov M V 1995 *Handbook of Thermoelectronics* (Boca Raton FL: CRC) p390
- [12] Makinson R E B 1938 *Proc. Camb. Phil. Soc.* **34** 474
- [13] Mott N F 1936 *Proc. R. Soc. A* **156** 368
- [14] Mott N F, Jones H 1936 *The Theory of the Properties of Metals and Alloys* (Oxford: Clarendon)
- [15] Jonson M, Mahan G D 1980 *Phys. Rev. B* **21** 4223
- [16] Wegrowe J E, Anh Nguyen Q, Al-Barki M, Dayen J F, Wade T L, Drouhin H J 2006 *Phys. Rev. B* **73** 134422
- [17] Sondheimer E H, Wilson A H 1947 *Proc. R. Soc. A* **190** 435
- [18] Chikazumi S 1997 *Physics of Ferromagnetism* (Oxford: Clarendon) p590

Influence of magnetic anisotropy thermoelectric effect on spin-dependent devices*

Chen Jia-Luo Di Guo-Qing[†]

(Jiangsu Key Laboratory of Thin Films, Department of Physics, Soochow University, Suzhou 215006, China)

(Received 27 February 2012; revised manuscript received 14 April 2012)

Abstract

While researching the thermoelectric effect of the nanocontact, we find that the thermoelectric voltage between both ends of the “T”-shaped Ni wire changes significantly by applying an external magnetic field, which we attribute to the influence of magnetic anisotropy of Ni wire. The effect of the external magnetic field always produces an extra force whose direction goes against the temperature gradient. And the extra force clearly corresponds to the magnetic field and temperature difference between both ends of the Ni wire. These results suggest that during studying spin-dependent devices, the testing methods and the configuration of magnetic material need to be noticed seriously in order to avoid interfusing additional electromagnetic signals which may bring about a miscarriage of justice to the experimental results.

Keywords: thermoelectric effect, magnetic anisotropy, Ni wire

PACS: 72.15.Jf, 75.30.Gw, 44.10.+i

* Project supported by the Basic Research Program of Jiangsu Province, China (Grant No. 05KJA43006).

[†] E-mail: gqdi@suda.edu.cn