

横向交、直流电流对蓝青铜 $K_{0.3}MoO_3$ 的 $I-V$ 特性的调制效应*

郑毅¹⁾ 沈静琴¹⁾ 陈学枝¹⁾ 王洪涛²⁾ 许祝安¹⁾ 张宣嘉¹⁾

¹⁾ 浙江大学物理系 杭州 310027)

²⁾ 温州师范学院物理与电子信息科学系 温州 325027)

(2003 年 7 月 9 日收到 2003 年 7 月 31 日收到修改稿)

通过 $I-V$ 特性测量,研究了横向交、直流电流对蓝青铜 $K_{0.3}MoO_3$ 中电荷密度波(CDW)动力学行为的影响.实验结果表明,无论是直流还是交流,随着横向调制电流的增大,CDW 滑移的阈值电场均会相应地减小,但横向交流电流的调制效应较小,可能更接近本征的效应.考察了横向交流电流的调制效应与其频率的依赖关系.

关键词: $K_{0.3}MoO_3$ 单晶, 电荷密度波, 横向电流调制效应

PACC: 7145L, 7215N, 7320D

1. 引 言

近年来,电荷密度波(CDW)在低维材料中的非平衡态动力学行为受到了广泛的关注^[1-6]. 横向电流对其 $I-V$ 特性的调制效应就是其中的热点课题之一. 这个效应是由 Radzihovsky 和 Toner^[7]首先提出来的. 通过理论计算,他们得出在 CDW 滑移的垂直方向上(即横向)所加的电流(称为 I_x)会对 CDW 的关联产生指数级的影响,从而导致阈值电场 E_t 随横向调制电流 I_x 呈指数下降. 他们的理论计算很快得到了实验的部分证实. Markovic 等^[8]在 $NbSe_3$ 样品上, Yue 等^[9]和我们小组^[10]在 $K_{0.3}MoO_3$ 样品上,都分别观测到了这个效应,不过相互之间存在较大差异. 特别是 Yue 等的 E_t 数据在定量上与 Radzihovsky 和 Toner 的理论不符. 同时, Artemenko 等^[11]也针对实验数据提出了不同的模型和实验验证. 我们则指出, 横向电流电极的细微不对称也对电流调制效应有关键的影响^[10].

本文报道了蓝青铜样品中横向直流和交流电流对 $I-V$ 特性的调制效应. 我们发现,无论是直流还是交流, 阈值电场 E_t 均存在着对横向电流 I_x 的依赖关系,但横向交流电流的调制效应可能反映出更本

征的特性.

2. 实验方法

实验中的蓝青铜单晶是通过电解高温熔液结晶法制备的. 原料为 K_2CO_3 和 MoO_3 粉末(纯度均在 99.9% 以上),按 1:4.4 左右的摩尔比混合后在 540℃ 预烧. 再次研磨后在 500—600℃ 温区电解结晶 72 h. 经过切割和解理后,样品的尺寸约为 4.5 mm × 1.8 mm × 0.4 mm. 长链的方向沿着 $[010]$ 方向(称为纵向),采用标准的四电极方法测量纵向的 $I-V$ 特性;另外沿着 $[20\bar{1}]$ 方向对称的两个电极用来输入横向调制电流. 样品电极制作完成后被固定在蓝宝石基片上. 实验中用 Keithley 2400 型数字源表提供沿纵向的直流电流,用 Keithley 2182 型纳伏电压表测量样品直流电压,用 Lakeshore 120 型电流源和 EG&G 5210 型锁相放大器分别提供横向的直流和交流的调制电流. 为了防止热效应,测量过程中样品被直接浸在液氮里,并且在测量 $I-V$ 特性过程中采用短脉冲信号(持续时间约为 3 ms),两个脉冲之间等待 10 s 以上. 为了消除热电势对实验结果的影响,在测量 $I-V$ 特性时对纵向电压采用了正、反向电流平均的方法.

* 国家自然科学基金(批准号:19904009,10225417)资助的课题.

3. 实验结果和讨论

图 1(a) 是分别在不同的横向直流调制电流 I_x 下, 蓝青铜样品在温度为 78 K 时的 V - I 关系曲线 (即 I - V 特性), 图 1(b) 是相应的微分电阻 dV/dI 随电场 E 的变化关系. 图 1(a) 中插图则为该样品的电阻率 ρ (对数坐标) 随温度 T 的变化关系, 从中可以看到, 在 $T_p \approx 180$ K 时发生了金属-绝缘体相变, 对应着晶格的 Pereils 相变和费米面上 CDW 能隙的形成. 从图 1(a) 的 I - V 特性可以看出, 随着电压增加, I - V 曲线

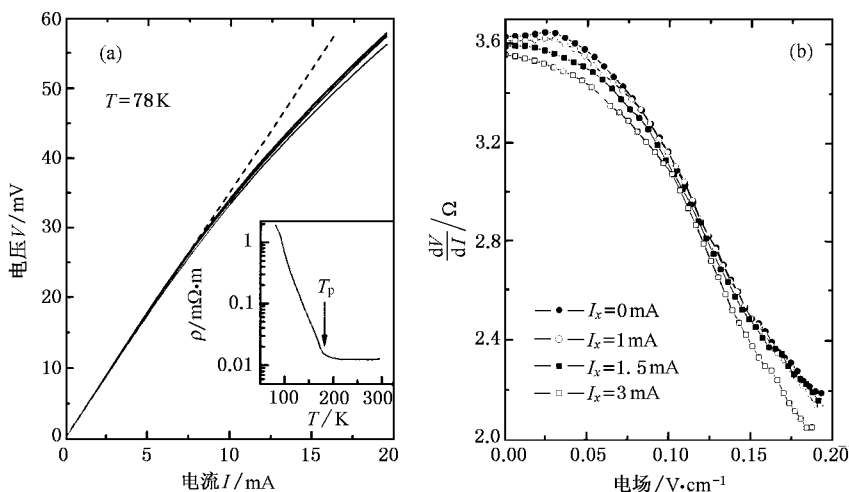


图 1 $\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$ 在不同的直流横向调制电流下的 V - I 关系曲线 (a) 和相应的微分电阻在不同的横向直流调制电流 I_x 下随纵向电场的变化关系 (b) (a) 图中的 V - I 曲线由上往下 I_x 依次为 0, 1, 1.5, 3 mA. 插图为该样品的 ρ - T 关系

在我们以前的实验中^[10]已经发现, 如果横向直流调制电流 I_x 的极性反向, 则调制效应有极大的改变, 甚至于出现阈值电场 E_t 随 I_x 增加反而增加的现象. 因此, 在本文中采用了纵向电流正、反向两次测量取平均结果, 所得的调制效应明显地小于 Yue 等的结果^[9]. Artemenko 等^[11]则从理论上分析了高度各向异性电导率和电极几何构形对横向调制效应的重要影响, 认为本征的横向电流调制效应较小, 而横向电流引起的纵向电场不均匀对 E_t 的影响更大. 这寓示着实验观测到的结果不一定是本征的横向电流调制效应, 可能受到来自几何形状以及不均匀性的干扰. 因此, 测量横向低频交流电流的调制效应, 可以消除调制电流的正负极性不对称等干扰, 有助于认识横向电流对 CDW 阈值电场 E_t 的作用.

在图 2 中我们分别给出了在不同大小的横向交

流调制电流下, 蓝青铜样品的 I - V 特性 (图 2(a)) 以及相应的微分电阻随电场的变化关系 (图 2(b)), 测量温度同样为 78 K. 交流电流的频率为 $f = 100$ kHz, \tilde{I}_x 有效值从 0 变到 1.5 mA. 我们可以看到交流调制电流下 I - V 特性变化很小; 在相应的微分电阻曲线上, E_t 的变化尽管较小, 但仍可看出随 \tilde{I}_x 增加而下降.

我们还进一步考察了横向交流调制效应与横向交流电流频率的依赖关系, 结果如图 3 所示. 在这些实验中, 横向交流调制电流 \tilde{I}_x 有效值被固定为 1.5 mA, 分别测量了在不同频率的横向交流调制电流影响下样品的 I - V 特性 (图 3(a)), 并求出了对应的微分电阻 dV/dI (图 3(b)). 从图 3 可以看到, 横向交流电流的频率对 I - V 特性有很大的影响: 在 1 和 50 kHz 下测得的 I - V 曲线和 $I_x = 0$ mA 时得到的 I - V

曲线有很大的不同,但当 f 大于 100 kHz 后,差异就

变得相对较小了,但 E_1 的调制效应依然存在.

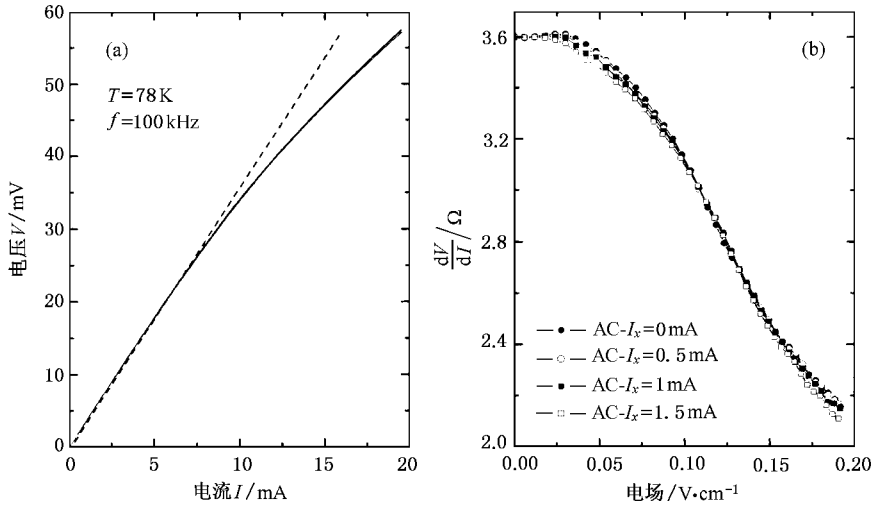


图 2 $K_{0.3}MoO_3$ 在不同的横向交流调制电流 I_x 下的 $V-I$ 关系曲线 (a) 和相应的微分电阻在不同的横向交流调制电流 I_x 下随纵向电场的变化关系 (b) (a) 图中 $V-I$ 曲线由上往下依次为 0, 0.5, 1, 1.5 mA

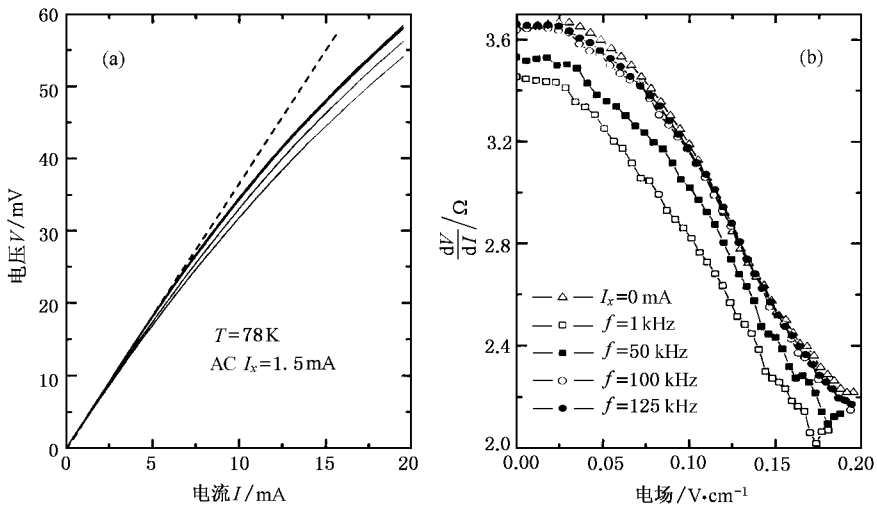


图 3 在相同的横向交流调制电流下 ($I_x = 1.5$ mA), $V-I$ 关系曲线随横向交流调制电流频率 f 的变化关系 (a) 和在不同横向调制电流频率下 相应的微分电阻随纵向电场的变化关系 (b) (a) 图中 $V-I$ 曲线从上往下依次为: $I_x = 0$ mA, $f = 1, 50, 125$ kHz

这些现象说明,横向交流电流也与直流电流一样对 CDW 的动力学行为有着调制作用,无论什么频率和幅值, E_1 均减小.随着频率 f 增大,调制作用变弱.与横向直流调制电流相比,横向交流调制电流可以消除正负不对称的影响,反映出更本征的横向电流调制效应.正如 Artemenko 等^[11]所指出的,本征的

横向电流调制效应应该小于 Markovic 等^[8]实验观测到的结果,而横向交流电流调制效应确实小于直流的情况,更接近本征的效应.总之,无论是横向的直流还是交流电流,都对 CDW 的 $I-V$ 特性产生调制效应.横向交流电流调制效应与频率的依赖关系值得进一步的研究.

- [1] Grüner G 1988 *Rev. Mod. Phys.* **60** 1129
- [2] Thorne R E 1996 *Physics Today* **49** 42
- [3] Balents L ,Fisher M P A 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 4270
- [4] Lemay S G ,Thorne R E ,Li Y *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 2793
- [5] Stanescu T D ,Martin I ,Phillips P 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1288
- [6] Feng T ,Wang N L ,Chen Z J *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2113 [in Chinese] 冯 天、王楠林、陈兆甲等 2002 物理学报 **51** 2113]
- [7] Radzihovsky L ,Toner J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 3711
- [8] Markovic N ,Dohmen M A H ,Van der Zant H S J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 534
- [9] Yue S ,Tian M ,Zhang Y 2001 *Phys. Rev. B* **64** 113102
- [10] Zheng Y ,Xu Z A ,Shen J Q *et al* 2002 *Phys. Lett. A* **305** 433
- [11] Artemento S N ,Zaitsev-Zotov S V ,Minakova V E *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5184

Modulation effect of transverse alternating and direct currents on $I-V$ characteristics in blue bronze $K_{0.3}MoO_3$ *

Zheng Yi¹⁾ Shen Jing-Qin¹⁾ Chen Xue-Zhi¹⁾ Wang Hong-Tao²⁾ Xu Zhu-An¹⁾ Zhang Xuan-Jia¹⁾

¹⁾*Department of Physics ,Zhejiang University ,Hangzhou 310027 ,China)*

²⁾*Department of Physics and Information Science ,Wenzhou Normal College ,Wenzhou 325027 ,China)*

(Received 9 July 2003 ; revised manuscript received 31 July 2003)

Abstract

We have investigated the transverse alternating and direct current effect on the charge-density wave (CDW) dynamical properties in $K_{0.3}MoO_3$ by measuring $I-V$ characteristics. The results show that ,no matter whether DC or AC transverse current is used ,the CDW depinning field(E_t) along the longitudinal direction is effectively suppressed as the transverse current increases . But the effect of AC current on $I-V$ characteristics is weaker and probably closer to the intrinsic effect. A frequency dependence of transverse AC modulation effect was observed.

Keywords : $K_{0.3}MoO_3$, charge-density wave , current modulation effect

PACC : 7145L , 7215N , 7320D

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 19904009 and 10225417).