

组分调制 Cu_3NPd_x 的大温区恒定电阻率*纪爱玲 杜允 黄饶 李超荣 曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

摘要 单一固体材料的电阻率是关于温度的复杂函数. 目前尚未见关于相当大的温度范围内恒定电阻率的报道. 对恒电阻的需求仍然是通过材料结构组合或电路设计实现的. Cu_3NPd_x 随组份的变化会经历半导体-半金属相变. 在 $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.238}$ 中可以在 240 K 的温度范围内测得不变的电阻率. 这一发现至少表明大温区内恒电阻是可以在单一材料内实现的, 它对固体物理的理解本身以及诸多应用都有重要的意义.

关键词 温阻系数, Cu_3NPd_x , 半导体-半金属相变, 组份调制

Composition – modulated Cu_3NPd_x for invariant resistivity over a wide temperature rangeJI AI-Ling DU Yun HUANG Rao LI Chao-Rong CAO Ze-Xian[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics Beijing 100080, China)

Abstract Electrical resistivity for individual solids is generally a complicated function of temperature. There has been no report on a constant electrical resistivity in a sizable temperature range observed in any single solid, and the constant resistance demanded for many applications has been realized only through structure designs or circuits. In the composition-modulated Cu_3NPd_x which undergoes semiconducting-to-semimetallic transition, a nearly vanishing temperature coefficient of resistance was measured in a temperature range over 240 K in $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.238}$. This, to the least, demonstrates the possibility of constant resistivity in a single solid, thus is of significance for both the understanding of solid-state physics and applications.

Keywords temperature coefficient of resistance, Cu_3NPd_x , semiconducting-to semimetallic transition, composition modulation

如果在相当大的温度范围内, 材料的某种物理性质表现出很小的温度系数, 那么这种材料通常会具有很高的应用价值. 一个有名的例子是殷钢 (Invar, 又称微胀合金), 它是一种镍铁合金 (有时也会掺入少量其他元素), 可以在大温区内 ($> 100\text{K}$) 表现出很小的线性热胀系数 (室温下 $\sim 10^{-6}/\text{K}$)^[1]. 当温度改变时, 殷钢的尺寸只有非常小的变化, 所以它是实现测量/定位以及其他更多功能的极佳候选材料. 众所周知, 电阻是一种非常重要的物理性质, 试想一种材料一旦具有不变的电导率, 它将会拥有多少新奇的应用? 然而, 由于多种散射机制对温度有不同的依赖关系, 而正是这些散射决定了固体的电输运行行为, 因此对于单纯的固体材料来说, 电阻率通

常是一个关于温度的复杂函数^[2]. 从室温到低至液氮温度 ($\sim 4\text{K}$), 大多数固体的电阻率大体上会有几个数量级的改变^[2]. 就我们所知, 迄今没有关于大温区内表现出电阻温度系数几乎为零的固体的报道. 目前许多关键应用中所需要的对温度不敏感电阻基本上是通过复合材料结构设计或电路中的补偿机制得以实现的. 最近, 在对组分调制的 Cu_3NPd_x 薄膜的半导体-半金属转变行为的研究中, 我们发现, 在 240K 到 5K 的温度范围内, 此材料体系中能实现几乎为零的电阻温度系数.

* 国家自然科学基金(批准号: 60306009, 50472070, 10404034, 10574147)资助项目

2006-08-10 收到

[†] 通讯联系人. Email: zxcao@aphy.iphy.ac.cn

母体材料 Cu_3N 是反 ReO_3 晶格结构(图1)的带宽约为 1.9eV 的典型间接带隙半导体^[3],但由于费米面上对称点 M 和 R 之间加上 R 和 X 之间的能带交叉,由 Pd - 原子占据 Cu_3N 晶格中心所形成的钙钛矿结构的 Cu_3NPd 具有半金属特性^[4]. Cu_3N 晶格中心插入 Pd 原子会使得共价键严重扭曲,使得那些 $x > 0.5$ 的 Cu_3NPd_x 样品结晶质量变差,所以我们将讨论局限在 $0.0 \leq x \leq 0.350$ 的样品. 对所有的这些薄膜样品, X 射线衍射花样(图2)以及透射电子显微图(图3)都显示出良好的结晶状态.

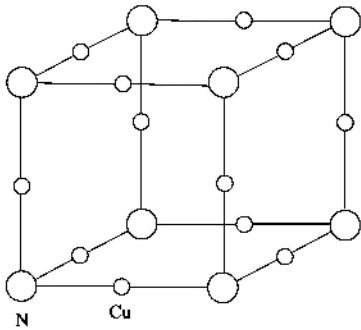


图1 Cu_3N 晶格结构示意图(其晶格常数为 $a = 3.829\text{\AA}$)

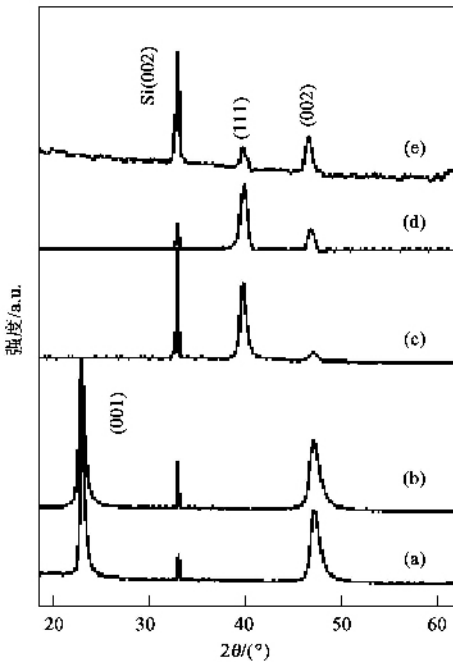


图2 不同 x 值的 Cu_3NPd_x 的 X 射线衍射花样 (a) 本征 Cu_3N ; (b) $x = 0.048$; (c) $x = 0.175$; (d) $x = 0.238$; (e) $x = 0.349$

从室温开始冷却,本征 Cu_3N 的电阻率迅速窜

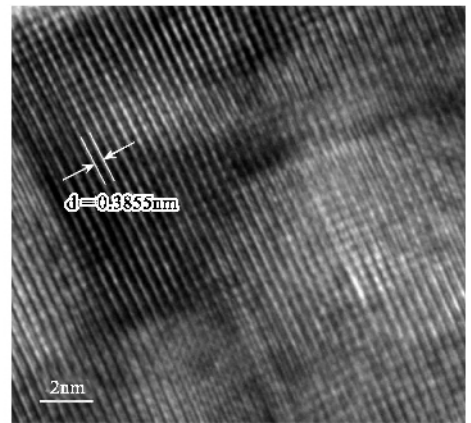


图3 $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.08}$ 的高分辨透射电子显微像(Pd 原子的插入使 Cu_3N 的晶格略有增大,这里 $a = 3.855\text{\AA}$)

升,在 165K 时即超过系统的量程(图4(a)). 这一观察结果与 Cu_3N 这种欠缺半导体的宽带隙本性是一致的^[3,5]. 插入 Pd 原子之后, Cu_3NPd_x 合金显示出改良的电输运特性. 少量的 Pd 的掺入,如 $x = 0.048$ 和 $x = 0.071$ 样品所表现的那样,便将由温度下降而导致电阻急速上升的临界点移动到 50K 以下,表明当前样品有变窄了的带隙(图4(b), (c)). 当 Pd 浓度进一步增加时,半导体 - 半金属转变开始,从而电阻温度系数符号改变. 对于 $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.175}$ 样品,在宽达 270K 的温区内,随着温度的降低电阻率大致呈线性增长(图4(d)),电阻温度系数为负的 0.00039 K^{-1} . 取 $T = 280\text{ K}$ 为参考点,电阻在如此宽的温度范围内仅改变了约 5.0% . 与此相对, $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.349}$ 的电阻率在 50 至 280K 的范围内同样显示出较好的线性行为,但电阻温度系数为正的 0.00117 K^{-1} (图4(f)). 我们期望介于这两种情形之间,电阻温度系数能在宽的温区内恒为零. 事实上,在 $\text{Cu}_3\text{NPd}_{0.238}$ 样品中我们也确实发现了这一现象:从 240K 至 5K ,电阻温度系数几乎为零,并且电阻率的相对方差小到了 1.42×10^{-5} .

电导率对温度的依赖容易受到各种因素的影响,没有严格的定律可以遵循. 对于半导体而言,其电导率形式上可表示为 $\sigma = e(n_e\mu_e + n_h\mu_h) = e^2(n_e\tau_e/m_e^* + n_h\tau_h/m_h^*)$,这里面所有符号的含义都依循常规. 载流子密度和载流子迁移率都是随温度变化而变化的,且这种变化依赖于具体的材料^[2,6]. 对窄带半导体和半金属来说,情况更为复杂. 它们的载流子分布函数服从一种介于费米 - 狄拉克分布和麦克斯韦 - 玻尔兹曼分布之间的统计规律. 此外,这里导带是 Kane 型,电子的有效质量随着

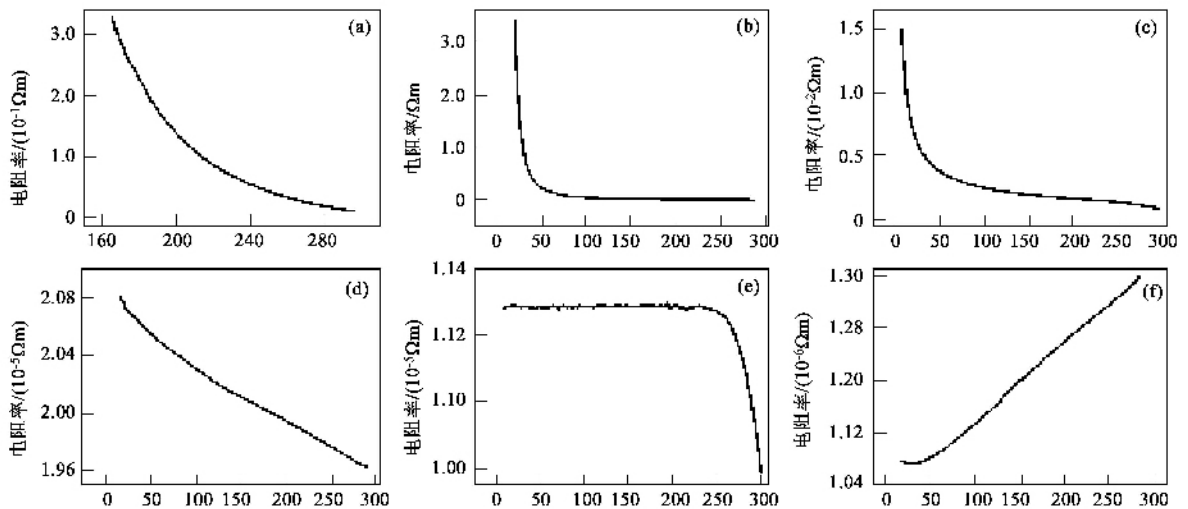


图4 Cu_3Npd_x 薄膜电阻率对温度(单位 K)的依赖关系 (a) 本征 Cu_3N ; (b) $x=0.048$; (c) $x=0.071$; (d) $x=0.175$; (e) $x=0.238$; (f) $x=0.349$ (从(a)到(f), 室温下的电阻率下降了4个数量级)

载流子密度变化而变化,从而也随着温度变化^[7]. 常数电阻温度系数出现在这种固体的带隙变窄转变为半金属的过程中. 这一现象的产生源自于载流子密度和载流子迁移率随着温度而向相反方向改变(涉及到多种相关的散射机制)所碰巧达到的一个微妙的平衡. 虽然对细节的微观过程目前还无法给出一个清晰的图像,但此发现证实了在通过组分调制产生半导体到半金属变化的某些材料中,载流子密度和载流子迁移率确实可在一个宽的温区内有可能会发生互相补偿的随温度的变化. 考虑到固体电阻不随温度改变是多么的不可思议,我们相信目前的这一结果对固体物理学的理解本身具有一定的意义,它必定会激发起人们探寻同类材料的热情以及

对相关机制的深入研究. 毫无疑问的,更多此类材料的发现必将带来许多新颖的应用.

参 考 文 献

- [1] Wasserman E F. *Ferromagnetic Materials*. Ed. Buschow K H J, Wohlfarth E P. vol. 5, Northholland, Amsterdam, 1990
- [2] Kittel C. *Introduction to Solid State Physics* (8th edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, 2004
- [3] Du Y, Ji A L, Ma L B *et al.* *J. Cryst. Growth*. 2005, 280 :480
- [4] Hahn U, Weber W. *Phys. Rev. B*, 1996, 53 :12684
- [5] Ji A L, Huang R, Du Y *et al.* *J. Cryst. Growth*. 2006, 295 :79
- [6] Yu P Y, Cardona M. *Fundamentals of Semiconductors* (2nd edition). Springer, Berlin, 2003
- [7] Lovett D R. *Semimetals & narrow - bandgap semiconductors*. Pion Limited, London, 1977

· 信息服务 ·

欢迎订阅《现代物理知识》

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学科的一份中、高级科普性期刊.其前身是创刊于1976年的《高能物理》科普杂志.该刊以生动活泼的语言介绍现代物理知识、传递科技前沿动态,以深入浅出的形式做到科学性和趣味性并重.适合广大的科学工作者、教育工作者、科学管理干部、研究生、大、中学生以及物理学爱好者阅读.

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目.2007年《现代物理知识》每期定价8元,全年6期48元,欢迎新老读者订阅.

1. 邮局订阅:

邮发代号 2-824

2. 汇款到编辑部(免邮资)

汇款地址 北京 918 信箱《现代物理知识》编辑部收

邮编 100049