

FeMnAl 合金低温声子热导率的反常行为

阎守胜 高利明 万君佐 彭正伟 应志强

(北京大学物理系)

1984 年 7 月 9 日收到

提 要

我们在 4.2—30K 测量了具有电阻负温度系数的晶态 Fe-25Mn-5Al-0.2C 合金的热导率, 发现其声子热导率主要随温度线性变化, 可能是由于 Al 的加入使电子平均自由程减小, 从而对声子散射减弱所致。

引 言

不久前阎守胜等人报道了在一种大块晶态 FeMnAl 合金中观察到的电阻负温度系数的反常行为^[1]。目前对这个样品反常产生的原因和机制还没有满意的解释。热导是反映材料内部电子、声子及其它元激发的运动和相互作用的另一宏观可测物理量, 材料热导行为的研究有可能从不同的角度提供信息。为此我们在 4.2—30K 的温度范围内对文献[1]中所用的 Fe-25Mn-5Al-0.2C 合金样品(样品 1)的热导率进行了测量。为了比较, 还测量了 Mn 成分相同但不含 Al 且电阻行为正常的 FeMn 合金样品(样品 2)。

二、实验方法和结果

样品的制备方法见文献[1]。表 1 给出除 Fe 以外样品中其它成分重量百分比的化学分析结果。热导采用绝热稳态杆状样品法测量^[2], 温度及温差用两支铂电阻温度计测量, 恒温器的真空度好于 10^{-6} mmHg, 为了减小固体传导漏热, 电引线采用 $\phi 0.03$ mm 的低热导

表 1

	C	Mn	Al	S	P
样品 1	0.16	24.95	5.76	0.009	<0.005
样品 2	0.029	25.05	—	0.024	0.006

锰铜线, 在样品和恒温器真空室之间加有和样品温度相同的紫铜防辐射屏以减小辐射漏热。测量经过多次检验, 测量误差估计小于 4%。

图 1 给出测量的结果, 其中样品 2 的结果与类似成分的 FeMn 合金文献报道值^[3]相近。

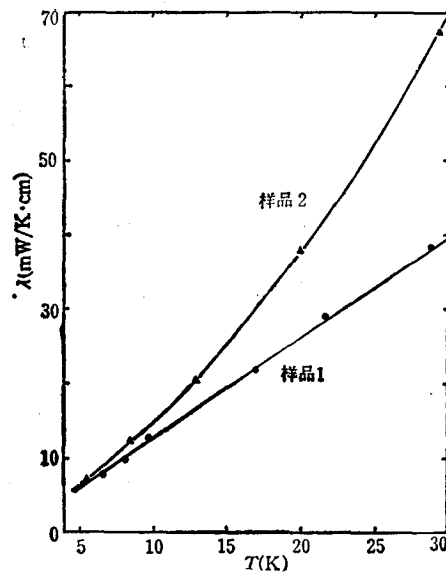


图 1

三、讨 论

1. 合金的热导率 λ 一般可表示为电子热导率 λ_e 和声子热导率 λ_p 之和^[4], 即

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_p. \quad (1)$$

在 4.2K 附近, 电子主要受杂质缺陷散射的限制, λ_e 的数值大小可由剩余电阻率 ρ_r 的测量值根据 Wiedemann-Franz 定律求出. 此时, 电子热导率 λ_e 和 T 成正比, 即

$$\lambda_e = \frac{L_0}{\rho_r} T \propto T, \quad (2)$$

其中 $L_0 = 2.45 \times 10^{-8} \text{ W/K}^2$ 是 Lorentz 数. 在低温下, 合金中的声子则主要受电子散射的限制, 声子热导率正比于 T^2 . 因此, 合金的低温热导率

$$\lambda = \beta T + ET^2, \quad (3)$$

其中 β 和 E 是与样品有关的常数.

无 Al 样品 (样品 2) 的电阻温度行为是正常的, 用线性回归方法处理热导率测量的实验数据, 得

$$\lambda = 1.07T + 0.042T^2, \quad (4)$$

其中 λ 的单位采用 $\text{mW/cm} \cdot \text{K}$. 由它的剩余电阻率 $\rho_r = 27 \mu\Omega\text{cm}$ 可算出 $\beta = 0.91$, 和 (4) 式中 1.07 相近, 样品 2 的热导率随 T 的变化行为也是正常的.

对于含 Al 的电阻温度系数反常的样品 1, 用线性回归方法处理实验结果得到

$$\lambda = 1.17T + 0.0067T^2. \quad (5)$$

从 $\rho_r = 127 \mu\Omega\text{cm}$ 估算出电子热导率 $\lambda_e = 0.193T$, 从总的热导率中扣除 λ_e , 得到

$$\lambda_p = 0.99T + 0.0067T^2. \quad (6)$$

可见在样品 2 中, 声子热导的 T^2 项所占比例很小, 在 4.2—30K 温度范围内, 只占 λ_p 的

2.8—17%。声子热导基本上随 T 线性变化, 常见的声子散射机制不能给出这种结果^[4], 这是一种反常的行为。

图 2 给出样品 1, 2 的 λ/T 对 T 的变化曲线。样品 1 近乎是一条水平的直线, 表明了其行为与样品 2 本质上的不同, 其主要贡献来自于 T 的一次方项。图 3 是扣除 λ_e 后, λ_p 随温度的变化, 除去显示出样品 1, 2 λ_p 温度行为的不同外, 而且给出在 T 低于 23K 时, 样品 1 的声子热导比样品 2 更大一些。

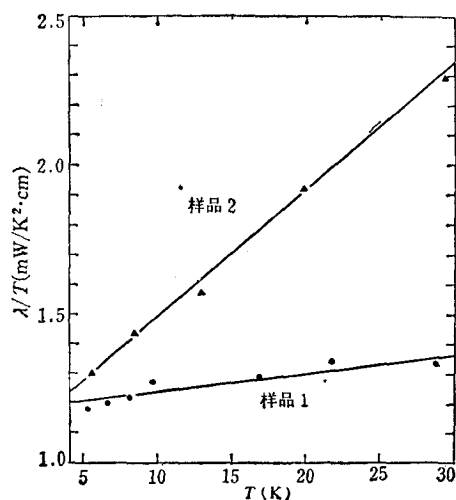


图 2

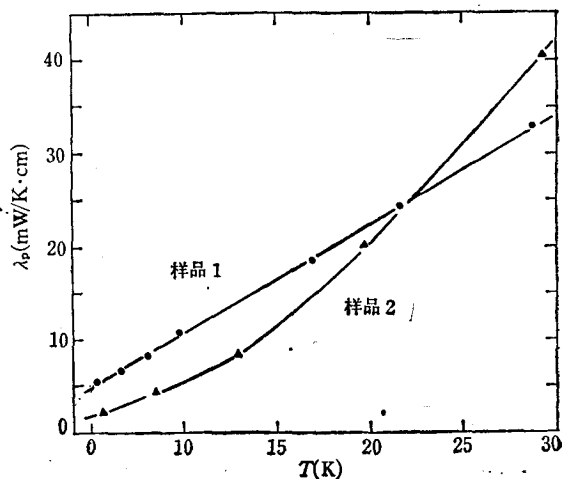


图 3

2. 样品 1 声子热导在低温下较大且具有反常的随 T 线性变化的行为, 可能是由于 Al 的加入使样品剩余电阻率增高, 电子的平均自由程 Λ_e 变得很短, 因而在液氦温区附近, 声子波长远大于 Λ_e , 从而电子对声子的散射明显减小^[5]所致。这种散射的减弱显然会导致 λ_p 的加大, 另外, Lindenfeld 等人^[6]曾用这种理论讨论了无色散, 各向同性金属中自由电子对声子的散射。假定声子的纵模和横模独立地和电子相互作用, 并认为杂质的含量和质量等仅通过改变样品的剩余电阻率和限制传导电子的自由程来对声子的热导起作用, 对 Cu 基合金, Lindenfeld 等人具体计算了 $\lambda_p/(\rho_r T)$ 对 T/ρ_r 的关系曲线。在低温和高剩余电阻的条件下, 曲线给出 $\lambda_p/(\rho_r T)$ 为常数, 因而 λ_p 正比于 T 。如果采用同样的简单假定, 则将 Lindenfeld 等人的曲线除以因子 k 便可得到 FeMnAl 样品的理论曲线

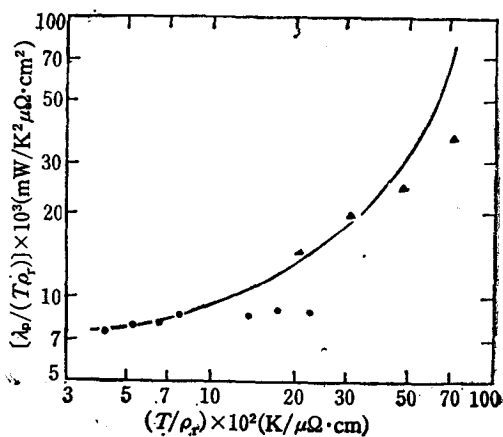


图 4

● 为样品 1; ▲ 为样品 2

$$k = \frac{M^{\text{Cu}} N^{\text{S}} V_{\text{F}}^{\text{S}} m^{*\text{S}}}{M^{\text{S}} N^{\text{Cu}} V_{\text{F}}^{\text{Cu}} m^{*\text{Cu}}} \quad (7)$$

其中 M 是摩尔质量, N 是每个原子的平均传导电子数, m^* 是电子的有效质量, V_{F} 是费密速度, 上标 Cu 及 S 分别表示该参数属于 Cu 基合金或 FeMnAl 合金。

当 k 取值 6.6 时理论曲线和实验大体相符(图 4)。如取 $M^{\text{Cu}} \sim 64\text{g}$, $M^{\text{S}} \sim 55\text{g}$, $V_{\text{F}}^{\text{Cu}} \sim 1.57 \times 10^8 \text{cm/s}^{[7]}$, $V_{\text{F}}^{\text{S}} \sim 1.97 \times 10^8 \text{cm/s}^{[7]}$, $N^{\text{Cu}} \sim 1$, 可得 $N^{\text{S}} m^{*\text{S}} \sim 4.5 m^{*\text{Cu}}$ 。如果认为 FeMnAl 合金中 $4s$ 电子 $N_{4s}^{\text{S}} \sim 0.9^{[8]}$, $m_{4s}^{*\text{S}} \sim m^{*\text{Cu}}$, $4s$ 电子的 $N_{4s}^{\text{S}} m_{4s}^{*\text{S}}$ 值为 $0.9 m^{*\text{Cu}}$, 和所要求的 $4.5 m^{*\text{Cu}}$ 的数值相差甚远, 说明在考虑电子对声子的散射时, 还需要考虑 $3d$ 电子的贡献, 且 $3d$ 电子并不能都看作是传导电子, 这是合理的。

从图 4 看, 对于样品 1, 2, 温度升高时理论曲线都要比实验点上升得快一些。可能来源于实际情况要比简单的理论复杂, 如温度升高时纵模和横模声子的耦合会变得越来越重要, 材料的费密面有别于球面等^[5]。

感谢刘福绥同志仔细地阅读了初稿。

参 考 文 献

- [1] 阎守胜等, 物理学报, **32**(1983), 1082.
- [2] 阎守胜、陆果, 低温物理实验的原理与方法, 科学出版社, (1984).
- [3] Y. S. Touloukian *et al.*, Thermal Conductivity; Metallic Elements and Alloys. New York, Plenum, (1970).
- [4] H. M. Rosenberg, Low Temperature Solid State Physics, Oxford, (1963).
- [5] A. B. Pippard, *Phil. Mag.* **46**(1955), 1104.
- [6] P. Lindenfeld and W. B. Pennebaker, *Phys. Rev.*, **127** (1962), 1881.
- [7] N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, Solid State Physics, Holt, Rinehart and Winston, (1976).
- [8] 肖纪美, 不锈钢的金属学问题, 冶金工业出版社, (1983).

ANOMALOUS BEHAVIOUR OF THE LOW TEMPERATURE PHONON CONDUCTIVITY OF AN FeMnAl ALLOY

YAN SHOU-SHENG GAO LI-MING WAN JUN-ZUO

PENG ZHENG-WEI YING ZHI-QIANG

(Department of Physics, Peking University)

ABSTRACT

Measurements have been made at 4.2—30 K for the thermal conductivity of a polycrystalline Fe-25Mn-5Al-0.2C sample with negative temperature coefficient of resistivity. It is found that the phonon conductivity is anomalously proportional to T . The suggested explanation is that this phenomenon results from the noneffectiveness of the scattering of phonons by electrons, when electrons have short mean free path caused by addition of Al.