

纳米金属 Tm 的电子浓度研究*

侯碧辉^{1)†} 刘凤艳¹⁾ 焦彬¹⁾ 岳明²⁾

1) (北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

2) (北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

(2011 年 4 月 18 日收到; 2011 年 8 月 1 日收到修改稿)

电子浓度是与金属的宏观特性相关的重要参数. 反射光谱和霍尔效应分别是得出电子浓度和载流子浓度的基本实验. 两个纳米稀土金属铥 Tm 样品 (样品 1, 平均粒径 100 nm, 样品 2, 平均粒径 10 nm) 的红外—紫外反射光谱实验表明, 金属铥 Tm 表面的反射光学性质具有金属的特征, 6 s 能带具有与碱金属相近的电子浓度 n_p , 数值分别为 $2.434 \times 10^{28}/\text{m}^3$ 和 $1.701 \times 10^{28}/\text{m}^3$. 而样品的霍尔效应实验测得金属 Tm 的载流子是电子-空穴型的, 载流子浓度 n_H 仅分别为 $8.032 \times 10^{24}/\text{m}^3$ 和 $7.679 \times 10^{24}/\text{m}^3$, 仅仅是费米面附近的电子-空穴状态. 另外, 铥 Tm 的电导率比半导体的大 3 个量级. 晶粒纳米化使电子浓度 n_p 减小, 电导率 σ 减小, 载流子浓度减小, 而霍尔系数 R_H 增大.

关键词: 纳米晶金属铥 Tm, 电子浓度, 红外—紫外反射光谱, 霍尔效应

PACS: 73.63.-b, 71.20.Eh, 71.10.Ca, 42.25.Bs

1 引言

纳米材料的物性研究及其应用问题是当前凝聚态物理中的热门问题. 稀土元素多晶材料的电、磁特性基本上已经清楚, 而了解当稀土元素变成纳米颗粒时电、磁特性会有什么变化, 更深入地认识材料性能, 是值得研究的问题.

基于应用的需要, 对金属材料的研究人们通常比较注重对金属样品的电导率 σ (电阻率 ρ) 的测量, 较少关注对电子浓度 n 的相关测量. 而应用金属自由电子气体模型对金属材料进行分析研究时, 最重要的物理参量是自由电子浓度 n . 它不仅在自由电子模型理论中具有重要意义, 而且还是金属自由电子模型唯一的独立参量, 也直接决定了金属材料的宏观特性. 不同金属材料电、磁特性的差别其根源在于电子浓度 n 的不同. 根据金属自由电子气体模型, 由电子浓度 n 可以求出与金属相关的其他物理量, 例如, 准电子的有效半径 r_s , 费米能量 E_F , 费米波矢 k_F , 费米速度 v_F , 费米温度 T_F 等物理量. 确定

电子浓度 n 最直接、最重要的实验方法是霍尔效应和金属的反射率频谱测量^[1a].

金属自由电子气体模型主要适用于碱金属, 以及一些碱土金属, 稀土元素的电导率较碱金属低 2—4 个量级, 属于类金属. 我们采用反射率频谱实验和霍尔效应实验的方法对电子浓度和载流子浓度进行研究. 我们曾研究过不同粒径的稀土金属镱 (Dy) 纳米晶块体材料的电阻率随温度的变化^[2]. 实验发现声子散射电阻率 $\rho_{\text{pho}}(T)$ 随温度升高而增大. 样品电阻率的测量值在 $(0.8—252) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 范围, 体现出类金属的特征. 实验还发现平均粒径为 10 nm 的样品的剩余电阻率 $\rho(0)$ 约为 $98.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 比其他样品的剩余电阻率大一个数量级, 这是纳米化使电子能带变窄出现带尾和定域化电子的实验例证.

对稀土金属铥 (Tm) 的研究多见于 Tm 的化合物及掺杂 Tm 的一些功能材料^[3], 对金属 Tm 的研究主要注重与磁性相关的研究^[4,5]. 本文通过对两个不同粒径 (100 nm 和 10 nm) 的纳米金属 Tm 样

* 国家自然科学基金 (批准号: 50771002) 资助的课题.

† E-mail: houbh@bjut.edu.cn

品的红外—紫外反射光谱实验求出电子浓度, 分析研究稀土金属 Tm 的电子浓度特征, 以及晶粒纳米化对宏观特性的影响. 电导率实验发现稀土金属 Tm 的纳米块体输运性质优于半导体, 晶粒纳米化使电导率随之减小; 霍尔效应实验测量得出两个样品的载流子都是电子-空穴型的, 晶粒纳米化使霍尔系数增大, 载流子浓度减小, 对实验现象的分析得出, 霍尔效应实验测到的是费米面附近的载流子的浓度.

2 实验

我们的研究中发现, 多数稀土金属单质材料在空气中极易氧化, 不宜保存, 而 Tm 纳米晶块体样品不易氧化, 可以进行霍尔效应和反射光谱实验. 样品是用放电等离子烧结 (SPS) 技术制备的^[4,6]. 设备型号为 SPS-5.40 MK-IV/ET. 此设备能在可控条件下制备出粒径均匀的纳米材料. 以高纯度 (> 99.99 wt.%) 金属 Tm 粗晶的块体 (平均粒径为 1000 nm) 为原料, 在高纯氩气保护下利用高能振动球磨机, 研磨 50 h 之后, 将粉末装入硬质合金模具, 在 500 MPa 压强和 573 K 下, 用 SPS 装置快速烧结成为全致密块体样品材料, 研究的两个样品分别为: 样品 1, 在 573 K 快速烧结后还经过 773 K 热处理 (平均粒径为 100 nm); 样品 2, 在 573 K 快速烧结, 未经热处理 (平均粒径为 10 nm). 样品为直径约 20 mm 的薄圆片, 样品 1 的厚度 $d = 2.26$ mm, 样品 2 的厚度 $d = 2.08$ mm.

块体样品的紫外—可见光—红外反射光谱实验采用的是日本岛津 (ShiMaDZu) 公司 UV-3101PC 光谱仪, 波长范围为 2500—200 nm, 实验是在室温条件下进行的. 块体样品在紫外—可见光—红外波段无透射, 即 $T(\lambda) = 0$.

ET9000 系列电输运性质测试系统可以自动化测试霍尔效应、磁电阻、 I - V 特性等. 我们采用

该测试系统, 在室温下进行了直流电导率和霍尔效应的实验测量.

3 结果与讨论

3.1 反射率光谱

两个 Tm 样品在 200—2500 nm 的反射光谱实验曲线 $R(\lambda)$ 如图 1 和图 2 所示. 在这个波段金属样品的透射率为零, 反射率 $R(\lambda)$ 低于 50%, 随频率增大 (波长减小), $R(\lambda)$ 减小, 表明样品的表面吸收和散射随频率增大而增大. 反射谱曲线 $R(\lambda)$ 在 840 nm 附近有小的变动是由于实验中变换光源所至. 整个反射谱的特征与典型金属的反射谱相似.

金属样品的反射率极小值对应着这种金属的等离子振荡频率 ν_p (或角频率 ω_p , 对应波长 λ_p). 样品 1 (573 K 烧结, 773 K 处理) 的反射率极小值是 $R(\lambda) = 3.439\%$, 对应 $\lambda_p = 214$ nm, $\omega_p = 8.808 \times 10^{15}$ Hz. 而样品 2 (573 K 烧结) 的反射率极小值是 $R(\lambda) = 2.383\%$, 对应 $\lambda_p = 256$ nm, $\omega_p = 7.363 \times 10^{15}$ Hz. 两个样品的反射率极小值对应的波长都在紫外波段, 与碱金属的紫外透射极限值相近 (λ_p : Li-200 nm, Na-210 nm, K-310 nm, Rb-360 nm)^[1b], 这显现出 Tm 的金属性. 另一方面, 对于理想的金属在低频下反射率 $R(\lambda)$ 应很大, 几乎为 100%, 而 Tm 的反射率在低频下只有大约 50%, 这表明 Tm 样品表面对低频光子的吸收和散射比理想金属要大得多, 类似于半导体. 由等离子振荡角频率 ω_p 也可以计算出样品的电子浓度^[1b], 为了与霍尔效应的电子浓度相区分, 将由等离子体振荡得出的电子浓度记为 n_p ,

$$\omega_p^2 = \frac{n_p e^2}{\epsilon_0 m^*}, \quad (1)$$

其中 e 是电子的电荷, ϵ_0 是真空介电常数, m^* 是电子的有效质量, 近似采用电子静态质量, 这样, 可以求出两个样品的电子浓度分别为 $2.434 \times 10^{28}/\text{m}^3$ 和 $1.705 \times 10^{28}/\text{m}^3$, 并列于表 1 中.

表 1 两样品的平均粒径、等离子振荡波长 λ_p 、等离子振荡角频率 ω_p 、电子浓度 n_p 、准电子的有效半径 r_s 、费米半径 k_F 和 Δk

样品	平均粒径/nm	λ_p/nm	$\omega_p/10^{15} \text{ Hz}$	$n_p/10^{28} \text{ m}^{-3}$	r_s/nm	$k_F/10^9 \text{ m}^{-1}$	$\Delta k/10^6 \text{ m}^{-1}$
1	100	214	8.802	2.434	0.214	8.97	2.96
2	10	256	7.363	1.705	0.241	7.96	3.59

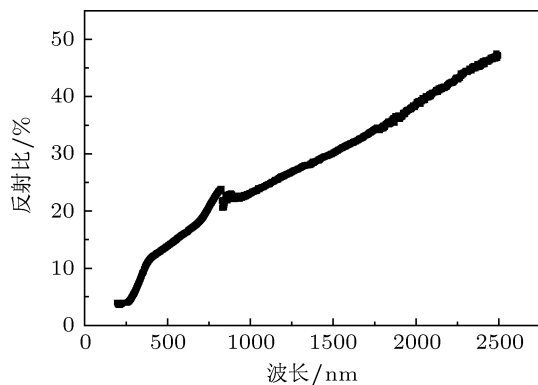


图1 样品1的反射光谱

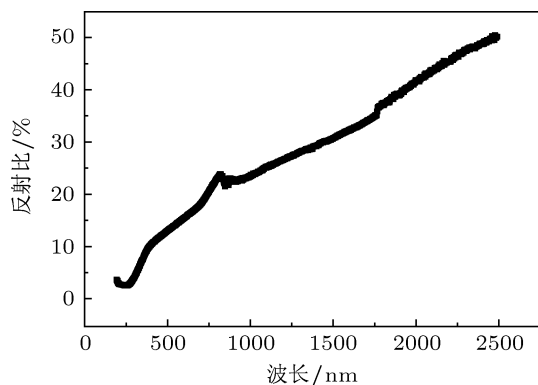


图2 样品2的反射光谱

为了便于分析比较,从样品的结构也可以求出电子浓度, Tm 是六角密积结构,晶格常数为 $a = 0.354 \text{ nm}$, $c = 0.556 \text{ nm}$ ^[7a]. Tm 的共有化电子是 $6s^2$ 电子. 取六角密积结构为体积单元 V , 其中含有 6 个原子, $Z = 6$, 每个原子贡献两个 $6s$ 电子, 这样求出理想的 Tm 晶体的电子浓度为

$$n_0 = \frac{2 \times Z}{V} = \frac{2Z}{3 \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c} = 6.63 \times 10^{28} / \text{m}^3. \quad (2)$$

由 (2) 式得出的结果与表 1 中两个样品的电子浓度在量级上是相同的, 这表明通过金属的反射光谱得到的是全部导带的电子在单位体积中的数目, 这是符合金属的自由电子气体模型的; 而且, 两个样品的电子浓度均小于理想晶体的电子浓度 n_0 , 表明电子浓度随晶粒减小而减小. 由电子浓度, 还可计算出每个准电子平均占据的体积及等效球半径等^[1c],

$$r_s = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_p}}. \quad (3)$$

由 (3) 式得出的两个样品的准电子平均等效球半径见表 1. 与玻尔半径 0.0529 nm 相比, 金属 Tm 的

准电子半径要大四、五倍, 与碱金属的等效球半径有相同的数量级^[1d], 说明从表面的光学性质来看, Tm 具有金属的特征.

3.2 霍尔效应

霍尔效应实验的电流为 10 mA , 磁场范围 $0 \sim 2.0 \text{ T}$, 而且载流子是电子 - 空穴型的. 图 3 是两个样品在室温下的霍尔效应实验结果, 明显的表现出反常霍尔效应现象^[8].

对于非磁性的金属或半导体薄片 (厚度为 d), 将其放置在 x - y 平面内, x 方向通电流, 沿垂直于薄片平面的 z 方向加磁场 B ; 则电流 I_x 、霍尔电压 $V_y = V_H$ 和磁场 H_z 三者是互相垂直的, 它们与霍尔系数 R_H 之间的线性关系为

$$R_H = \frac{V_y d}{I_x B_z}. \quad (4)$$

这样霍尔效应的横向电阻率就为

$$\rho_{xy} = R_H B_z. \quad (5)$$

然而, 在铁磁性的金属材料样品里, 横向电阻率 ρ_{xy} 的大小除了包括上式中的常规项外, 还另外增加了与样品的磁化强度大小有关的反常项, 通常称为反常霍尔效应 (anomalous Hall effect). 低场的反常霍尔效应 V - B 直线斜率比高场的正常霍尔效应 V - B 直线斜率大. 由于低场的反常霍尔效应与自发磁化强度 M_s 有关, 也称为自发霍尔效应 (spontaneous Hall effect); 人们采用经验公式表述高场的正常霍尔电阻率 ρ_{xy} 与磁场的线性关系^[8]

$$\rho_{xy} = R_H B_z + 4\pi R_s M_s, \quad (6)$$

其中 R_s 称为反常霍尔系数, 通常它大于常规霍尔系数 R_H 至少一个量级以上, 且强烈地依赖于温度; M_s 为饱和磁化强度. (6) 式等号右边第二项相当于外磁场为零时的横向电阻率 ρ_0 , 对应于正常霍尔效应直线的截距 V_0 , 由 (4) 和 (6) 式可以推出霍尔电压 V_y 与磁场 B_z 的关系为

$$R_H = \frac{d}{I_x B_z} (V_y - V_0). \quad (7)$$

从图 3 看出两个样品低场的反常霍尔效应直线与高场的正常霍尔效应直线的拐点在 0.2 T 附近, 根据 ET9000 系列电输运性质测试系统测量的数据, 可由 (7) 式求出正常霍尔系数 R_H . 霍尔效应实验得出两个样品的载流子都是电子和空穴, 这是由

于 Tm 有 2 个 6s 电子, 在 k 空间费米面附近, 有的 6s 电子实际是填到了 6p 带, 而在 6s 带顶部形成空穴, 详见下面 3.4 的计算. 这样在样品中应当同时存在两种载流子: 6s 带顶部的空穴和 6p 带底部的电子. 假设像本征半导体一样, 载流的空穴和电子的数目应当是相同的, 而实验得出载流子是电子和空穴, 由 R_H 可求出对应的载流子浓度

$$n_H = \frac{1}{eR_H}. \quad (8)$$

表 2 样品 1, 2 及一些合金的载流子浓度 n_H , 霍尔系数 R_H ,

室温下的电导率 σ 和电阻率 ρ

样品	$n_H/10^{24} \text{ m}^{-3}$	$R_H/10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$	电导率 $\sigma/10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$	电阻率 $\rho/10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$
多晶 Tm	—	—	14.2	0.704
样品 1	8.032	7.771	2.476	4.039
样品 2	7.679	8.129	2.162	4.625
MgB ₂ ^[10]	—	$(20-50) \times 10^{-5}$	12.5—26.3	—
Mg _{0.93} Li _{0.07} B ₂ ^[10]	—	$(12-60) \times 10^{-5}$	7.69—14.3	—

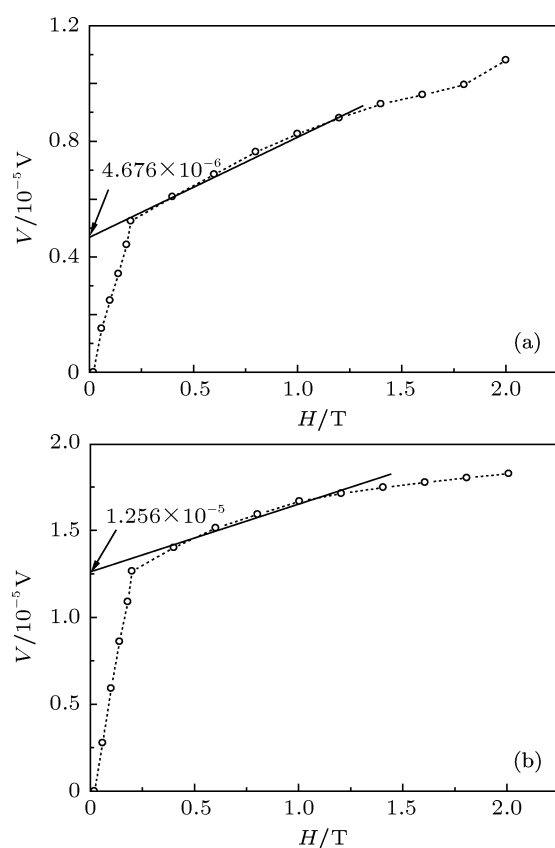


图 3 稀土金属 Tm 霍尔效应实验 $V-H$ 曲线 (a) 样品 1; (b) 样品 2

另外, 可以看出, 如果采用图 1 和图 2 中低场的霍尔效应直线的数据, 由 (4) 式求出的霍尔系数 R_H 一定还要大 1—2 个数量级, 那样求出的是受铁磁

表 2 中列出由测量数据得到的样品 1 和样品 2 的结果. 一般金属的霍尔系数 R_H 为 $10^{-12} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$, 半导体的霍尔系数 R_H 为 $10^{-4}—10^{-2} / \text{m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ ^[9a]; 合金 MgB₂ 和 Mg_{0.93}Li_{0.07}B₂ 的霍尔系数 R_H 为 $10^{-12} / \text{m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ 和电导率 σ 为 $10^3—10^4 / (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ^[10]. 半导体的电子浓度在 $10^{18}—10^{22} / \text{m}^3$ 量级, 从表 2 看出金属 Tm 的载流子浓度 n_H 比半导体的大至少两个量级, 而且随着样品晶粒变细而减小.

性影响的载流子浓度, 比上述的 n_H 还会小 1—2 数量级.

3.3 电导率

由 ET9000 系列电输运性质测试系统测得的样品 1 和样品 2 的电导率分别为 $2.476 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 和 $2.162 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 列在表 2 中. 表 2 中还列出了合金 MgB₂ 和 Mg_{0.93}Li_{0.07}B₂^[10] 的电导率, 以作比较. 多晶金属 Tm 在室温的电导率为 $1.42 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ (即电阻率 $70.4 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)^[11]. 而一般半导体的电导率 σ 为 $10^2—10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ^[9b] 量级, 一般金属的电导率为 $10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ^[9c], 金属 Tm 的电导率介于金属和半导体之间, 应当属于类金属. 而且随着样品晶粒变细, 晶粒纳米化使得金属 Tm 的电导率略有减小.

从霍尔效应实验中我们得出纳米晶金属 Tm 的载流子浓度 n_H 比半导体的大四个量级, 电导率比半导体的大 5 个量级.

3.4 k 空间费米面附近的电子

碱金属和贵金属的电子浓度 n 在 $10 \times 10^{28} / \text{m}^3$ 量级^[7b], 霍尔系数 R_H 在 $10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ 量级^[7c], 等离子体振荡波长 λ_p 约为 $0.1 \mu\text{m}$ ^[7d]. 与表 2 中数

据比较, 碱金属的电子浓度 n 比 Tm 中电子 - 空穴大 4 个数量级, 霍尔系数 R_H 比 Tm 小 3 个数量级, 而等离子体振荡波长 λ_p 是相同的量级, 这表明对于理想金属而言, 通过反射光谱实验得出的电子浓度和霍尔效应实验得出的载流子浓度是相同的, 即由 (1) 式得到的电子浓度 n_p 和由 (8) 式得到的载流子浓度 n_H 相同, 实验测到的都是金属导带的全部电子在单位体积中的数目, 即 $n_H = n_p = n_0$. 但对于稀土金属 Tm, (1) 式得到的 n_p 和 (8) 式得到的 n_H 显然是不相同的, 电子浓度 $n_p = n_0$ 比载流子浓度 n_H 大几个数量级.

从能带论的角度思考 Tm 金属的基本电、磁特性, Tm 是稀土族元素, 其能带结构的特点是 4f 电子的能带窄, 态密度高, 6s 电子的能带宽, 态密度低. 一方面, 有可能 4f 与 6s 电子能带在 k 空间某些方向有交叠, 从而产生杂化, 使得载流电子数目减少. 纳米晶粒结构的长程无序使得 Tm 金属的导带底向下伸出带尾, 处在带尾的电子的迁移率为零, 不再是载流子. 另一方面, 我们假设仅仅是费米面附近的电子或/和空穴才是载流子, 这样 (8) 式中的 n_H 仅仅是 k 空间费米面附近量子化的状态点对应的真实 r 空间的载流子浓度. 在 k 空间费米球的半径 k_F , 与其在真实的 r 空间的电子浓度 n_p 的关系为 [1e]

$$k_F^3 = 3\pi^2 n_p. \quad (9)$$

k 空间布里渊区的范围是与晶体的结构有关的, Tm 是六角密积结构, 晶格常数为 $a = 0.354 \text{ nm}$, $c = 0.556 \text{ nm}$. 它的空间晶格是简单六角, 每个格点联系着两个全同的 Tm 原子, 考虑它的倒易空间的第一布里渊区的范围是

$$\frac{\pi}{a} = \frac{\pi}{0.354 \text{ nm}} = 8.875 \times 10^9 \frac{1}{\text{m}}, \quad (10)$$

$$\frac{\pi}{2c} = \frac{\pi}{0.556 \text{ nm}} = 2.825 \times 10^9 \frac{1}{\text{m}},$$

而样品 1 和样品 2 的 k_F 分别为 $8.97 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ 和 $7.96 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, 样品的费米球在 c 方向都越过了第一布里渊区边界, 即 6s 带顶的状态点 (E_1, K_1) 的能量大于 6p 带底的状态点 (E_2, K_2) 的能量, 这样 6s 带没填满电子, 有的电子态就填到了 6p 带, 类似于碱土金属的情况, 霍尔效应测到的空穴载流子是 6s 带的空穴对应的浓度.

假设费米球半径 k_F 减小为 k' , 使得其对应

的 n' (即 6s 电子中非载流子的浓度) 与 n_p 之差等于 n_H , 由 (9) 式可以得出

$$k'^3 = 3\pi^2 n' = 3\pi^2 (n_p - n_H). \quad (11)$$

由于 n_H 比 n_p 小四个量级, 载流子的状态占据的费米球表面的厚度为

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_F - k' \\ &= k_F - k_F \sqrt[3]{\frac{n_p - n_H}{n_p}} \\ &= k_F - k_F \sqrt[3]{1 - \frac{n_H}{n_p}}. \end{aligned} \quad (12)$$

泰勒级数展开, 取一级小量

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_F - k_F \sqrt[3]{1 - \frac{n_H}{n_p}} \\ &= k_F - k_F \left(1 - \frac{n_H}{3n_p} - \frac{n_H^2}{9n_p^2} + \dots \right) \\ &\approx k_F \times \frac{n_H}{3n_p}. \end{aligned} \quad (13)$$

由 (9) 和 (13) 式计算得出样品 1 和样品 2 的 k_F 分别为 $8.97 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ 和 $7.96 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, Δk 在 10^6 m^{-1} 量级, 数据也列于表 1 中. 载流子的状态占据的费米球表面的厚度比费米球半径小 3 个量级, 费米球表面有可能改变状态的电子和空穴对应的表层的能量厚度 δE 与温度 T 有关,

$$\begin{aligned} E &= \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m_e}, \\ \delta E &= \frac{\hbar^2 k_F}{m_e} \delta k = k_B T, \end{aligned} \quad (14)$$

即

$$\delta k = \frac{m_e k_B T}{\hbar^2 k_F}, \quad (15)$$

其中 m_e 是电子质量, k_B 是玻尔兹曼常数, 在室温 300 K 由 (15) 式求得 δk 分别为 $3.81 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 和 $4.26 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$. 而 Δk 在 10^6 m^{-1} 量级, 小于 δk , 说明仅仅处于费米面一薄层内的状态点的电子和空穴是载流子, 霍尔效应实验测量的即是这部分电子和空穴对应的浓度.

另外, 值得一提的是, 金属的泡利顺磁性就是由费米面附近的电子贡献的, 但是很弱; 而稀土金属的铁磁性是由未充满壳层的 4f 电子贡献的. 典型金属的载流子是费米球内的所有电子, 导电性强; 而稀土金属 Tm 具有 $6s^2$ 电子, 它的载流子只是费米球表面的电子和空穴, 导电性比金属弱.

4 结 论

研究稀土金属纳米晶 Tm 的电子浓度, 样品 1 的平均粒径为 100 nm, 样品 2 的平均粒径为 10 nm. 稀土金属 Tm 的霍尔效应实验和反射光谱实验的意义在于揭示出稀土金属 Tm 的块体输运性质属于类金属, 介于半导体和金属之间, 而表面的反射光学性质具有金属的特征.

样品的反射光谱实验表明, 从表面的光学性质来看, Tm 具有金属的特征, 等离子体振荡角频率 ω_p 分别为 (样品 1) 8.808×10^{15} Hz 和 (样品 2) 7.363×10^{15} Hz. 由反射光谱求出稀土 Tm 样品的导带 6s 电子的电子浓度 n_p , 具有与金属的电子浓度相同的量级, n_p 分别为 $2.434 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ 和 $1.701 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. 而室温电

导率 σ 分别为 $2.476 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 和 $2.162 \times 10^5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, 晶粒纳米化使样品的电子浓度 n_p 减小, 电导率 σ 也减小.

霍尔效应实验得出两个金属纳米晶 Tm 样品的载流子都是电子 - 空穴型的, 霍尔系数 R_H 分别为 $7.771 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$ 和 $8.129 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$, 载流子浓度 n_H 分别为 $8.032 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 和 $7.679 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$. 载流子浓度 n_H 比电子浓度 n_p 小 4 个数量级, 表明金属 Tm 的载流子浓度对应的仅仅是费米面附近的状态. 晶粒纳米化使霍尔系数增大, 而载流子浓度减小.

作者感谢北京工业大学应用数理学院赵金良博士对样品测量的帮助.

-
- [1] Ashcroft Neil W, David M N 1976 *Solid State Physics* (New York: Holt, Rinehart and Winston) a: p14, b: p18, c:p4, d:p5,e:p36
 - [2] Hou B H, Liu F Y, Yue M, Wang K J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017201 (in Chinese) [侯碧辉, 刘凤艳, 岳明, 王克军 2011 物理学报 **60** 017201]
 - [3] Zhang X L, Wang Y Z, Li L, Ju Y L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2196 (in Chinese) [张新陆, 王月珠, 李立, 鞠有伦 2007 物理学报 **56** 2196]
 - [4] Yue M, Zhang J X, Zeng H, Wang K J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 232504
 - [5] Richards D B, Legvold S 1969 *Phys. Rev.* **186** 508
 - [6] Yue M, Liu W Q, Zhang D T, Liu Y Q, Zhang J X 2004 *Journal of Functional Materials and Devices* **10** 318 (in Chinese) [岳明, 刘卫强, 张东涛, 刘燕琴, 张久兴 2004 功能材料与器件学报 **10** 318]
 - [7] Charles Kittel 2005 *Introduction to solid state physics* eight edition (John Wiley & Sons, Inc), a:p20, b:p139, c:p155, d: p399
 - [8] Liang Y C, Zhang Y, Guo W L, Yao Y G, Fang Z 2007 *Physics* **36** 385 (in Chinese) [梁拥成, 张英, 郭万林, 姚裕贵, 方忠 2007 物理 **36** 385]
 - [9] Shuishi Iida, Zhang Z X, translated 1979 *The Tables of the Physics Numerals* (Science press) a: p141, b: p131, c: p133 (in Chinese) [饭田修一等编, 张质贤等译, 1979 物理学常用数表 (科学出版社) a: p141, b: p131, c: p133.]
 - [10] Li H L, Ruan K Q, Li S Y, Mo W Q, Fan R, Luo X G, Chen X H, Cao L Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2044 (in Chinese) [李慧玲, 阮可青, 李世燕, 莫维勤, 樊荣, 罗习刚, 陈仙辉, 曹烈兆 2001 物理学报 **50** 2044]
 - [11] Colvin R V, Sam Legvold, Spedding F H 1960 *Phys. Rev.* **120** 741

Study of electron density of nanostructure metal Tm*

Hou Bi-Hui^{1)†} Liu Feng-Yan¹⁾ Jiao Bin¹⁾ Yue Ming²⁾

1) (College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (college of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 18 April 2011; revised manuscript received 1 August 2011)

Abstract

Electron density is an important parameter for the macroscopic properties of metal. The reflectance spectrum measurement and the Hall Effect measurement are basic experiments for obtaining electron density and carrier density. Two samples (sample 1:100 nm, sample 2:10 nm) of nanostructure block rare earth metal Tm are studied. Their reflectivity spectra show that the surface reflection of Tm metal possess metallic optical properties in a region of infrared-ultraviolet, the electronic densities n_p of 6s band are $2.434 \times 10^{28}/\text{m}^3$ and $1.701 \times 10^{28}/\text{m}^3$ similar to that of alkali. The carriers measured by Hall Effect experiment are of cavity type in the two samples, and the carrier densities n_H are $8.032 \times 10^{24}/\text{m}^3$ and $7.679 \times 10^{24}/\text{m}^3$ respectively. They are only states near the Fermi surface. In addition, the conductance of Tm block is three orders of magnitude higher than one of semiconductor. The grain nanostructurization makes electronic density n_p , conductance σ , and carrier density n_H decrease, but Hall coefficient R_H increase.

Keywords: nanostructure metal Tm, electronic density, spectrum reflectance of infrared-ultraviolet, Hall effect

PACS: 73.63.-b, 71.20.Eh, 71.10.Ca, 42.25.Bs

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50771002).

† E-mail: houbh@bjut.edu.cn