

室温下金属铝膜的霍尔效应初步研究

高莹 孟庆云*

(北京化工大学理学院, 北京 100029)

摘要: 采用真空蒸发镀膜法制备了金属铝薄膜,在室温下,用四探针法测量了样品的电阻率和霍尔系数。结果表明,制成的金属铝膜,电阻率由块体材料的 $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 增大到薄膜样品的 $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; 霍尔系数由块体材料的 $10^{-11} \text{m}^3/\text{C}$ 数量级左右增大到 $10^{-4} \text{m}^3/\text{C}$ 数量级; 电阻率和霍尔系数随着金属铝膜厚度的减小而逐渐增大。

关键词: 真空蒸发; 载流子浓度; 电阻率; 霍尔效应

中图分类号: O484.3

引言

以霍尔效应为工作基础的霍尔器件是一种磁传感器,广泛应用于测量技术、电子技术、自动化技术等领域^[1]。随着半导体技术的应用和发展,出现了各种半导体霍尔元件,如硅、锑化钢、砷化钢、砷化镓等^[2-3]。制作霍尔器件要求材料同时具备高迁移率与较低的载流子浓度,半导体材料虽然有较低载流子浓度、但迁移率一般都很低,且工作温度范围窄,工作频率低,制备工艺复杂,成本高^[1-3]。相比之下金属导体可以很好地克服这些问题。近年来,随着薄膜技术的发展,人们考虑采用金属薄膜制作霍尔器件。用真空蒸发、溅射、化学沉积等方法制成纳米级别的金属薄膜,电阻率将会随薄膜厚度的减小而逐渐增大,电阻率与温度的关系逐渐接近半导体材料^[4]。为了揭示纳米金属薄膜的物理性质,特别是其电学特性,寻找磁灵敏度高、工作温度宽、制备简单的半导体替代材料,本文研究了金属铝薄膜的电阻率及霍尔效应。

1 实验部分

1.1 原材料和仪器

金属铝丝,纯度 99.99%,北京化学试剂厂;载玻片,规格 25.4 mm × 76.2 mm × 1.0 mm,天津化学试剂公司;KD-2 型常温快干导电银胶,北京钢拓冶

金技术研究所。

DH2010 型多功能真空实验仪,杭州大华仪器制造有限公司;SGC-1A 型椭圆偏振测厚仪,天津市港东科技发展有限公司;四探针电阻率磁电阻率测试仪,输出电流范围 1 μA ~ 200 mA,上海精密科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 金属铝薄膜的制备

采用真空蒸发方法,首先将基片经过乙醇、去离子水清洗,干燥后安装在真空镀膜机的真空室内,将金属铝丝放在钨舟上进行加热蒸发,衬底温度为 100 $^{\circ}\text{C}$,真空度小于 5×10^{-3} Pa。为了防止铝膜与空气接触发生氧化而影响电阻率及霍尔效应测量的结果,将所制铝膜在真空室内保存,测量时取出。

1.2.2 金属铝薄膜膜厚的测量

采用 SGC-1A 型椭圆偏振测厚仪测量样品膜厚。

1.2.3 金属铝薄膜的电阻率的测量

采用四探针电阻率测试仪对样品进行测量^[5]。金属铝薄膜样品的电阻率 ρ 可以由下式给出:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d \quad (1)$$

式中, I 为流经薄膜的电流, V 为电流流经薄膜产生的电压, d 为薄膜厚度。

1.2.4 霍尔效应的测试

根据霍尔效应原理^[6],把通电的条状半导体样品放在磁场中,且磁场的方向与电流方向垂直,则在垂直于电流和磁场的方向上将产生横向电压,即为霍尔电压。由霍尔电压通过下式可计算出材料的霍尔系数、载流子浓度、霍尔迁移率等各

收稿日期: 2011-09-30

第一作者: 女,1984年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: mengqy@mail.buct.edu.cn

项参数。

$$R_H = \frac{d}{B} \frac{V_H}{I_s} \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{|R_H| e} \quad (3)$$

$$\mu = \frac{1}{ne\rho} \quad (4)$$

$$K_H = \frac{V_H}{I_s B} \quad (5)$$

式中, R_H 为霍尔系数, d 为薄膜厚度, B 为磁感应强度, V_H 为霍尔输出电压, I_s 为控制电流; n 为载流子浓度, e 为电子电量; μ 霍尔迁移率, ρ 为材料的电阻率; K_H 霍尔元件乘积灵敏度。

为了避免由于薄膜太薄不易焊接电极而带来的误差, 实验中用导电银胶连接电极形成欧姆接触。在一对相对的电极上连接恒流源, 通以电流, 置于亥姆霍兹线圈中心, 使薄膜平面垂直于两线圈中心连线, 磁感应强度为 35.95 Gs 保持不变; 在另一对相

对的电极上连接电压测量仪器, 测量电位差, 即霍尔电压^[7-8]。实验中采用磁场和电流换向以消除副效应的影响。实验装置平面图如图 1 所示。

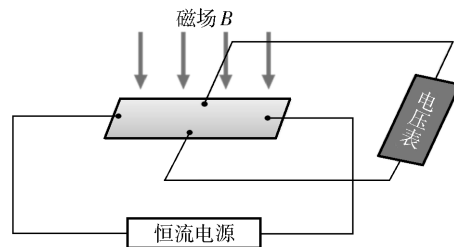


图 1 霍尔效应测量装置平面图
Fig. 1 Device for measuring the hall effect

2 结果与讨论

2.1 膜厚对电阻率和电导率的影响

对厚度分别为 300、250 和 200 nm 的金属铝薄膜进行了电阻率测量, 表 1 为各样品测量数据及按照式(1)计算得出的电阻率和电导率结果。

表 1 金属铝薄膜的电阻率和电导率

Table 1 Resistivity and conductivity of aluminum films

样品	膜厚/nm	电流/mA	电压/mV	电阻/ Ω	电阻率/ $\Omega \cdot m$	平均电阻率/ $\Omega \cdot m$	电导率/ $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$	平均电导率/ $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
1	300	1.5	0.837	0.558	0.762×10^{-6}	0.756×10^{-6}	1.312×10^6	1.323×10^6
		2.0	1.110	0.555	0.758×10^{-6}		1.320×10^6	
		2.5	1.383	0.553	0.755×10^{-6}		1.325×10^6	
		3.0	1.656	0.552	0.753×10^{-6}		1.327×10^6	
		3.5	1.929	0.551	0.752×10^{-6}		1.330×10^6	
2	250	1.5	1.390	0.927	1.050×10^{-6}	1.032×10^{-6}	0.952×10^6	1.000×10^6
		2.0	1.782	0.891	1.011×10^{-6}		0.989×10^6	
		2.5	2.173	0.869	0.984×10^{-6}		1.016×10^6	
		3.0	2.601	0.867	0.982×10^{-6}		1.018×10^6	
		3.5	3.019	0.862	0.977×10^{-6}		1.024×10^6	
3	200	1.5	18.920	12.614	1.143×10^{-5}	1.138×10^{-5}	8.750×10^4	8.788×10^4
		2.0	25.148	12.574	1.139×10^{-5}		8.778×10^4	
		2.5	31.369	12.548	1.137×10^{-5}		8.796×10^4	
		3.0	37.599	12.533	1.136×10^{-5}		8.806×10^4	
		3.5	43.844	12.527	1.135×10^{-5}		8.811×10^4	

从表 1 中数据可以看出, 不同厚度金属铝薄膜的电阻随着电流的增大、热效应增强而减小, 材料依然表现为金属特性; 而样品电阻率随着膜厚的减小呈现逐渐增加的趋势, 且比大块金属铝电阻率 $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 高 2~3 个数量级, 这说明减小薄膜厚度, 可以达到使材料的电阻率增大的目的。

金属薄膜的结构和性能跟薄膜的厚度有很大关系, 本文所测铝薄膜的电性能虽然与块状金属铝接近, 电阻率仍然较小, 但由于薄膜厚度减小, 必然导致其晶格不如块状金属的完整, 薄膜表面对电子存在一定的散射, 将会使电子的传导作用降低^[4]。晶界对电子也存在散射作用, 导致电子迁移率降

低^[9-11]。所以金属薄膜的电阻率会高于同类的块状金属材料。有文献指出^[12],薄膜在较薄的范围内,表面和晶界对传导电子的散射是构成薄膜电阻率尺寸效应的原因,薄膜较薄时,随着薄膜厚度减少,电阻率将急剧增大。从这个结论和本文的实验结果可以预见,如果把金属铝膜厚度减薄到一定的厚度时,电阻率随膜厚增大的趋势将愈加明显,甚至有可能出现类似于半导体的特性,那么将有可能实现金属的半导体化。

2.2 膜厚对霍尔效应参数的影响

对厚度约为 300、250 和 200 nm 的金属铝膜进行霍尔效应测试,由测试数据利用(2)、(3)、(4)、(5)式分别计算出样品的霍尔系数、载流子浓度、霍尔迁移率和霍尔灵敏度,结果见表 2。

表 2 霍尔效应测量实验数据

Table 2 Results of Hall effects measurements

膜厚 d/nm	霍尔系数 R_H $/10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$	载流子浓度 $/10^{22} \text{m}^{-3}$	迁移率 μ / $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	霍尔灵敏度 $K_H/10^{-3} \text{mV} \cdot$ $\text{mA}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$
300	0.987	6.333	130.556	0.329
250	1.045	5.973	101.260	0.418
200	8.348	0.749	71.620	4.174

室温下金属铝的霍尔系数在 $10^{-11} \text{m}^3/\text{C}$ 数量级左右,从表 2 计算出的数据可以看出,制成薄膜后样品的霍尔系数达到了 $10^{-4} \text{m}^3/\text{C}$ 数量级,且随薄膜厚度的减小,载流子浓度和霍尔迁移率也随之降低,霍尔系数增大。这是因为薄膜厚度变薄,单位体积内导电的电子数减少,即载流子浓度下降;而霍尔系数和霍尔灵敏度与载流子浓度密切相关,载流子浓度越小,霍尔系数越大,霍尔效应越明显。说明通过降低样品厚度来降低载流子浓度,可以得到较高的霍尔系数与霍尔灵敏度。

3 结论

室温下金属铝薄膜的电阻率随着膜厚减小逐渐增大,达到 $10^{-6} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 量级,比块状金属铝的电阻率 $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 高 3 个数量级。霍尔系数随膜厚减小、载流子浓度的降低增大到 $10^{-4} \text{m}^3/\text{C}$ 数量级。表明通过减小薄膜厚度,可以得到较高的电阻率与霍尔系数。

参考文献:

[1] 涂有瑞. 霍尔器件的技术状况与市场分析[J]. 通用

元器件, 1998(7): 57-61.

Tu Y R. The technical condition and market analysis of Hall devices [J]. Journal Purpose Components, 1998 (7): 57-61. (in Chinese)

[2] 周宏伟, 曾一平, 李歧旺, 等. InAs 薄膜 Hall 器件 [J]. 传感器技术, 1998, 17(5): 19-21.

Zhou H W, Zeng Y P, Li Q W, et al. InAs thin film Hall elements [J]. Journal of Transducer Technology, 1998, 17(5): 19-21. (in Chinese)

[3] 王红梅, 曾一平, 周宏伟, 等. InAs 薄膜 Hall 器件的材料生长与特性研究 [J]. 半导体学报, 1998, 19 (6): 413-416.

Wang H M, Zeng Y P, Zhou H W, et al. Growth and study of InAs thin films for Hall effect devices [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19 (6): 413-416. (in Chinese)

[4] 李言荣, 恽正中. 电子材料导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

Li Y R, Yun Z Z. Introduction to electronic materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)

[5] 刘新福, 孙以财, 刘东升. 四探针技术测量薄层电阻的原理及应用 [J]. 半导体技术, 2004, 29(7): 48-52.

Liu X F, Sun Y C, Liu D S. The principle and application of testing sheet resistance with four-point probe techniques [J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(7): 48-52. (in Chinese)

[6] 季振国. 半导体物理 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.

Ji Z G. Semiconductor physics [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005. (in Chinese)

[7] 孙慧卿, 范广涵. 基于霍尔效应的半导体外延片电参数测试 [J]. 传感器技术, 2004, 23(2): 38-43.

Sun H Q, Fan G H. Electric parameter test of semiconductor epitaxy slice based on Hall effect [J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(2): 38-43. (in Chinese)

[8] 王富成, 宋斌, 王彤涵. 范德堡法样品电极位置对测量结果的影响 [J]. 稀有金属, 1996, 20(3): 236-238.

Wang F X, Song B, Wang T H. Vander pauw method on measurement results of electrode position [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 1996, 20(3): 236-238. (in Chinese)

[9] Gerber A, Milner A, Karpovsky M, et al. Extraordinary Hall effect in magnetic films [J]. Journal of Magnetism

- and Magnetic Materials, 2002, 242/243/244/245: 90–97.
- [10] 范平, 伍瑞锋, 赖国燕. 连续金属薄膜的电阻率研究[J]. 真空科学与技术, 1999, 19(6): 445–451.
Fan P, Wu R F, Lai G Y. Calculation of metallic films resistivities[J]. Vacuum Science and Technology, 1999, 19(6): 445–451. (in Chinese)
- [11] 唐兆磷, 黄荣芳, 闻立时. 超薄金属膜电阻率尺寸效应[J]. 材料研究学报, 1997, 11(4): 438–440.
Tang Z L, Huang R F, Wen L S. Mechanism of size effect of electric conductivity in ultrathin metal film[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11(4): 438–440. (in Chinese)
- [12] Mayadas A F, Shatzkes M. Electrical-resistive model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces[J]. Physics Review, 1970, 14: 1382–1389.

Preliminary study of the Hall effect of aluminum metal films at room temperature

GAO Ying MENG QingYun

(School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aluminum metal films with thickness close to the nanometer scale have been fabricated by a vacuum evaporation coating method. The resistivity and Hall coefficient of the aluminum metal films were measured by the four-probe method. The resistivity of the sample increased from $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ for the aluminum bulk metal to $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ for the films, and the Hall coefficient increased from $10^{-11} \text{m}^3/\text{C}$ for the aluminum bulk metal to $10^{-4} \text{m}^3/\text{C}$ for the films. Higher resistivity and Hall coefficient were obtained by reducing the thickness of the aluminum metal film.

Key words: vacuum evaporation; carrier concentration; resistivity; Hall effect