Jan., 2013

文章编号: 1000-7032(2013)01-0045-04

室温下石墨烯的霍尔效应实验研究

安楠, 白浪, 李小俊*, 李渭龙, 任兆玉

(西北大学 光子学与光子技术研究所,陕西省光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地,陕西 西安 710069)

摘要:对用化学气相沉积法(CVD)研制的长、宽均为 1.23 cm,厚度为 3 个原子层尺寸的石墨烯样品,进行了室温下的霍尔效应相关研究。实验中电极与石墨烯之间有良好的欧姆接触。通过范德堡法测量了样品在磁场强度为 0.353 T,不同电流强度下的霍尔电压,并对结果进行处理分析,得到石墨烯的霍尔系数 $R_{\rm H}$ = 7.00 × 10^{-7} m³/C、载流子浓度 n = 10.52×10^{24} /m³、霍尔元件乘积灵敏度 $K_{\rm H}$ = 6.87×10^2 m²/C。

关键词: 石墨烯; 测量; 霍尔效应

中图分类号: 0471.1 文献标识码: A **DOI**: 10.3788/fgxb20133401.0045

Experimental Research on Hall Effect of Graphene at Room-temperature

AN Nan, BAI Lang, LI Xiao-jun*, LI Wei-long, REN Zhao-yu

(Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Shannxi Important Laboratory for Photoelectric and Functional Materials, Provincical Cultivation Base of State Improtant Laboratory, Xi'an 710069, China)

* Corresponding Author, E-mail: lixiaojun@nwu.edu.cn

Abstract: The grapheme samples were deposited on glass substrates by chemical vapor deposition (CVD). Both the length and width of graphene samples were 1.23 cm, and the thickness was 3 atomic layer thickness setting scales. The Hall effects at room temperature of the samples were studied. There was good ohmic contact between the sample and the electrode. By using van der Pauw method, the Hall voltage of the samples were measured under the magnetic field strength 0.353 T and different electric currents. The calculating results show that the graphene Hall coefficient $R_{\rm H}$ is $7.00 \times 10^{-7}~{\rm m}^3/{\rm C}$, the carrier concentration n is $10.52 \times 10^{24}/{\rm m}^3$ and the Hall element production sensitivity $K_{\rm H}$ is $6.87 \times 10^2~{\rm m}^2/{\rm C}$.

Key words: graphene; measurement; Hall effect

1 引言

石墨烯是由 sp² 轨道杂化的碳原子构成的单层二维正六边形元胞紧密蜂窝式结构晶格。自 2004 年被发现以来,石墨烯所具有的很多超越单层石墨的独特性质一直是科研人员关注和研究的

焦点。石墨烯的典型迁移率为 $1800 \sim 5000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。石墨烯中的电子采用狄拉克方程描述,在布里渊区,将电子近似地认为是光狄拉克费米子,有效质量为零,传输速度大约是光子速度的 1/300,若将其迁移率上限约束为 $200000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[3]}$,则其电阻率比铜或银的更低,只有

收稿日期: 2012-10-12; 修订日期: 2012-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(10974152,611770959,61275105); 陕西省教育厅科研计划(08JZ68,2010JS111,12JK0519)资助项目

作者简介:安楠(1986-),女,陕西渭南人,主要从事电磁作用下载流子行为的研究。

E-mail: annan168@ 126. com

大约 10⁻⁶ Ω·cm, 电子输运速度极快, 因此石墨 烯的迁移率具有达到 10⁶ cm²· V⁻¹· s⁻¹的潜 力^[4], 比硅的迁移率大 100 倍。基于这一点, 石墨 烯将成为可实现半导体灵敏器件的核心材料。现 在已经证明, 在室温下, 石墨烯还具有量子霍尔效 应^[5] 和双极性电场效应^[6]; 在温度 4 K 以下, 石 墨烯具有反常量子霍尔效应^[7-8]。由此, 石墨烯 可以以霍尔效应为基础用于霍尔元件。

本文对 3 个原子层厚度的石墨烯的电阻率、霍尔效应进行了研究。通过范德堡法测量了样品的霍尔电压,计算得到石墨烯的霍尔系数 $R_{\rm H}=7.00\times10^{-7}~{\rm m}^3/{\rm C}$ 、载流子浓度 $n=10.52\times10^{24}/{\rm m}^3$ 、霍尔元件乘积灵敏度 $K_{\rm H}=6.87\times10^2~{\rm m}^2/{\rm C}$ 。

2 实 验

2.1 实验材料和设备

石墨烯由西北大学光子所光电功能研究小组提供,用 CVD 法镀于载玻片上,长 1.23 cm,宽 1.23 cm,厚 3 个原子层。电极为 4 根铜丝,直径 0.3 mm,长度 5.0 cm。导电胶用于铜丝与石墨烯之间的连接,由上海浦东兴科公司生产。稳压电源采用宁波中策电子有限公司生产的型号为 1730SL20A 的 30 V 可调式直流电源,精度为 0.1 V。检流计使用的是杭州大华仪器制造有限公司生产的 AC15-A 型直流检流计,精度为 0.1 nA。实验中使用 2 块均匀强磁铁,其长、宽均为 5 cm,厚度为 0.5 cm,正方面为磁极。实验中使用的特斯拉计力田磁电技术应用研究所生产的 PF-03 型数字特斯拉计,精度为 0.1 mT。

2.2 实验过程

2.2.1 电极接触性检测

方形石墨烯的 4 个角分别引出 4 个电极,如图 1 所示。石墨烯又称单层石墨,所以石墨烯与

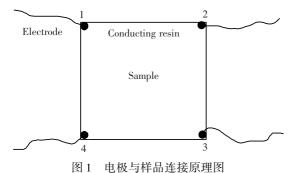


Fig. 1 The connection between electrode and sample principle diagram

电极之间用主要成分为石墨的导电胶连接,以实 现石墨烯与电极之间形成良好的欧姆接触,并且 在实验过程中为了保证测量的可靠性与科学性, 应尽可能地缩小电极与样品接触点的大小。

在测量过程中,石墨烯的 4 个电极依次在一对相邻的电极之间测电流,另一对相邻电极之间测电压,如电流 I_{12} 与电压 U_{34} 相对应, I_{23} 与 U_{41} 相 对应。实验结果如图 2 所示,样品未加磁场时,其伏安特性曲线为过原点的直线,表明实验中的电极与石墨烯形成了良好的欧姆接触。并且根据公式^[9]

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{R_{12\cdot 34} + R_{23\cdot 41}}{2} \cdot f\left(\frac{R_{12\cdot 34}}{R_{23\cdot 41}}\right), \quad (1)$$

计算出本实验样品石墨烯的具体电阻率为 $3.729 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 。其中,d 为样品厚度;f(x) 为范德堡因子,其取值在薄膜的情况下为 1。

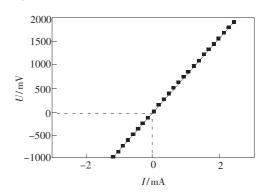


图 2 电极与石墨烯的接触特性曲线

Fig. 2 Electrode and graphene contact characteristic curve

2.2.2 霍尔效应的测量

范德堡法^[9]是用来测量任意形状、厚度均匀的薄膜霍尔效应的常用方法。实验根据范德堡原理测量霍尔系数 R_H 、电子浓度 n 和霍尔元件乘积灵敏度 K_H ,在测量过程中采用电流和磁场换向对称测量法(如表 1 所示),其目的是从实验结果中除去实验过程中的副效应影响。

表 1 电流和磁场换向对称测量法

Table 1 Current and magnetic directional symmetry measurement method

横向磁场	电流方向	霍尔电压	最终霍尔电压
+ <i>B</i>	+ I	U_1	. 1
+B	- I	U_2	$U_{\rm H} = \frac{1}{4} (\mid U_1 \mid +$
-B	+I	U_3	$\mid U_2 \mid + \mid U_3 \mid +$
-B	- I	U_4	$\mid U_4 \mid$)

图 3 为范德堡法测量霍尔效应原理图。实验中,外磁场沿 x 轴方向,强度为 0.353 T,其中一对角电极(如 1、3 电极)测量电流,另一对角电极(如 2、4 电极)测量霍尔电压,通过以下公式可计算出霍尔系数、载流子浓度和霍尔元件乘积灵敏度:

$$R_{\rm H} = \frac{d}{B} \cdot \frac{U_{\rm H}}{I},\tag{2}$$

$$n = \frac{1}{R_{\rm H} \cdot e},\tag{3}$$

$$K_{\rm H} = \frac{V_{\rm H}}{R \cdot I} \cdot \tag{4}$$

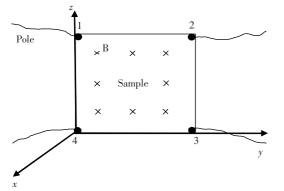


图 3 范德堡法测量霍尔效应原理图

Fig. 3 The principle diagram of van der Pauw's Hall effect measuring method

3 结果与讨论

应用此方法测得石墨烯的各种霍尔参数。实验数据与计算结果如表 2 所示,应用公式(2)、(3)、(4)分别求得霍尔系数为 7.00×10^{-7} m³/C、载流子浓度为 10.52×10^{24} /m³、霍尔元件乘积灵敏度为 6.87×10^2 m²/C、迁移率为 1.882.54 cm²·V⁻¹·s⁻¹。在载流子浓度的计算过程中,考虑到载流子的速度统计分布,n 需要引入 $\frac{3\pi}{8}$ 的修正因子^[10]。结果表明石墨烯的霍尔系数比目前应用较为广泛的半导体硅霍尔系数 1.64×10^{-3} m³/C^[11]小4个数量级,石墨烯特性介于导体与半导体之间。载流子浓度比硅的载流子浓度 1.5×10^{16} /m³^[11]大 9 个数量级,其迁移率在常温下大

于纯硅的电子迁移率 1 350 cm² · V⁻¹·s⁻¹[11]。 石墨烯是碳原子以 sp²杂化连续的单原子层组成 的一种新型晶体,剩余一个 pz 轨道上的电子在其 垂直平面上形成一个 π 键,π 电子可以自由移 动,这样便会赋予石墨烯良好的导电性。因此,石 墨烯可用于制备高速晶体管。巴斯夫和沃尔贝克 公司已经研制出了用于导电涂层的高传导石墨 烯,这为石墨烯在电子工业中的应用铺平了道路。 美国研究人员发明了一种石墨烯和碳纳米管的混 合材料,称之为介孔石墨烯,将以其为基础制作半 导体集成电路^[14]。

表 2 石墨烯霍尔效应测量结果

Table 2 The Hall effect measurement results of graphene

<i>I</i> /	U/	$R_{\scriptscriptstyle m H}$	n/	$K_{ m H}/$
mA	mV ($10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{C}^{-1}$) (10^{24} m^{-3})	$(10^2 \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-1})$
0.2	55	7.95	9.26	7.79
0.4	103	7.44	9.89	7.29
0.6	150	7.22	10.20	7.08
0.8	195	7.04	10.46	6.91
1.0	241	6.96	10.57	6.83
1.2	286	6.89	10.61	6.75
1.4	330	6.81	10.81	6.68
1.6	375	6.77	10.87	6.64
1.8	423	6.79	10.83	6.66
2. 0	469	6.77	10.87	6.64
2.2	515	6.67	10.89	6.63
2.4	568	6.84	10.76	6.70
2.6	621	6.90	10.67	6.77

4 结 论

应用范德堡法测量了石墨烯的霍尔参数,结果显示石墨烯的载流子迁移率为1882.54 cm²·V⁻¹·s⁻¹,超过了目前所承认的 InSb 的最大载流子迁移率。随着对石墨烯各项特性的不断深入研究,石墨烯终将成为新一代电子元件的核心原材料,其具有的优越性和独特性将会为电子工业带来更大的效益。

参考文献:

- [1] Katsnelson M I. Graphene carbon in two dimensions [J]. Mater. Today, 2007, 10(1):20-27.
- [2] Semennoff G.W. Condensed-matter simulation of a three-dimensional anomaly [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 53(26): 2449-2452.

- [3] Chen J H, Jang C, Xiao S, et al. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂ [J]. Nat. Nanotechnol., 2008, 3(4):206-208.
- [4] Mu Z Q, Zhu Z, Yang J Y, et al. Development present situation of grapheme [J]. J. Sichuan Univ. (四川大学学报), 2012, 49(2):423-428 (in Chinese).
- [5] Novoselov K S, Jiang Z, Zhang Y, et al. Room-temperature quantum hall effect in grapheme [J]. Science, 2007, 315 (5817):1379-1381.
- [6] Geim A K, Novoselov K S. The rise of grapheme [J]. Nat. Mater., 2007, 6(3):183-185.
- [7] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless dirac fermions in grapheme [J]. Nature, 2005, 438(7065):197-200.
- [8] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene [J]. Nature, 2005, 438 (7065):201-204.
- [9] Wu S C, Wang Z Q. Modern Physics Experiment [M]. Beijing: Peking University Press, 1986:534-536, 547-559 (in Chinese).
- [10] Huang K, Han R Q. Semiconductor Physics [M]. Beijing: Science Press, 1979:71-75 (in Chinese).
- [11] Liu E K, Zhu B S, Luo J S. Semiconductor Physics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008:57-60 (in Chinese).
- [12] Schedin F, Geim A K, Morozov S V, et al. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene [J]. Nat. Mater., 2007, 6:652-655.
- [13] Kim K, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent eletrodes [J]. Nature, 2009, 457(7230):706-710.
- [14] Xiao J, Mei D, Li X, et al. Hierarchically porous graphene as a lithium air battery electrode [J]. Nano Lett., 2011, 11 (11):5071-5078.