

石墨烯晶体管的栅长对跨导的影响

张庆伟,李 平,廖永波,王 刚,曾荣周,王 恒,翟亚红

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

摘 要: 对于传统的硅 MOS 场效应晶体管,器件跨导的大小正比于沟道的宽长比. 本文在石墨烯晶体管中发现了相反的现象. 制备了源漏之间距离相同,且沟道宽度相同的石墨烯晶体管,实验结果为沟道较长的晶体管跨导较大. 究其原因,石墨烯晶体管中栅电极覆盖的沟道面积较大时,被感应的载流子数量较多,所以跨导较大. 此实验结果和分析对石墨烯晶体管的进一步理解和应用有明显的意义.

关键词: 石墨烯晶体管;跨导;宽长比;硅 MOS 晶体管

中图分类号: TN312

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)12-0025-03

The Effect of the Gate Length on the Transconductance of Graphene Transistors

ZHANG Qing-wei, LI Ping, LIAO Yong-bo, WANG Gang,
ZENG Rong-zhou, WANG Heng, ZHAI Ya-hong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: To traditional Si MOS field effect transistors, the transconductance is proportional to the width length ratio of the channel. In this paper, the opposite phenomenon has been observed in graphene transistors. The graphene transistors with the same distance between source and drain electrodes and the same channel width have been fabricated. The transconductance with longer channel is larger. The reason is following. The channel area that covered by gate electrodes can affect the carriers in channel. The former is larger, the inductive latter is more. So, the transconductance is larger. The results and analysis are helpful to the comprehension and application of graphene transistors.

Key words: graphene transistors; transconductance; width to length ratio; Si MOS transistors

1 引言

随着硅器件的发展越来越接近于极限,由于石墨烯的很多优点,被认为是取代硅的热门材料之一^[1-4]. 石墨烯的迁移率是硅的一百多倍,高迁移率和高频率晶体管是石墨烯器件的一个热点研究方向. 报道的最高工作频率已达到了 400 GHz^[5]. 而石墨烯晶体管的高频率和高迁移率的特点,可以很明显地反映在晶体管的跨导上. 所以石墨烯晶体管的跨导是一个很重要的参数. 一些研究者用自对准结构

来提高其跨导,Damon B. Farmer 等人制备了自对准结构的石墨烯晶体管,比较了栅长相同,源漏间距不同时的情况,证明了自对准可以提高跨导. 并且用电阻模型解释了其机理^[6]. Cheng Rui 和 Liao Lei 等分别用自对准结构制备出了 427 GHz 和 300 GHz 的石墨烯晶体管^[5,7]. 本文在源漏间距相等的情况下,研究了栅电极长短不同时对石墨烯晶体管跨导的影响. 发现栅调制区域较长时,器件的跨导较大,并且给出了相应的机理分析. 有趣的是,此结果和硅器件中,跨导与沟道的宽长比成正比的结论相

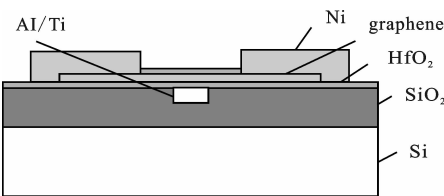
收稿日期: 2017-04-17; **修回日期:** 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61404021);电子薄膜与集成器件重点实验室开放基金(KFJJ201608)

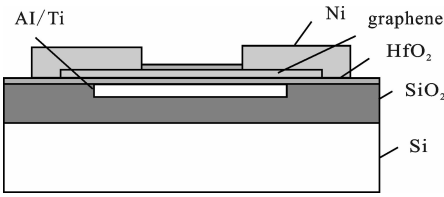
反. 此结果是石墨烯器件区别于硅器件的又一特点.

2 实验细节

衬底采用高阻硅上面高温氧化 1 微米厚的二氧化硅. 用三氟甲烷、氟气和氦气干法刻蚀的方法在二氧化硅上面刻蚀 600 纳米深的槽. 用电子束蒸发工艺在基片表面生长 10 纳米金属钛和 800 纳米金属铝, 把表面金属抛光掉以后只剩下槽里面的钛\铝作为栅电极. 用原子层沉积工艺在基片表面沉积 60 纳米厚的氧化铝作为栅介质. 石墨烯采用化学气相沉积法生长在铜箔上面, 腐蚀掉铜以后, 转移到基片上面. 生长和转移过程同参考文献[8]. 在石墨烯上面生长了 3 纳米铝, 自然氧化以后用来保护石墨烯. 用氧等离子体刻蚀使得石墨烯图形化为沟道形状. 电子束蒸发生长 40 纳米镍, 剥离形成源漏金属电极. 源漏金属间距为 4.5 微米. 同一个基片上面制备了两种不同的栅电极长度, 第一种情况为栅长 1 微米, 第二种情况为栅长 10.5 微米. 两种情况的器件结构如图 1 所示. A 和 B. 两种器件的沟道宽度均为 10 微米. 所有器件用安捷伦半导体参数分析仪 4 155B 在室温和大气条件下测量.



(a) 栅长较短的石墨烯晶体管



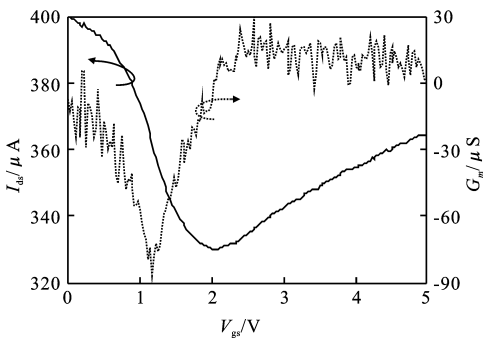
(b) 栅长较长的石墨烯晶体管

图 1 石墨烯晶体管的结构图

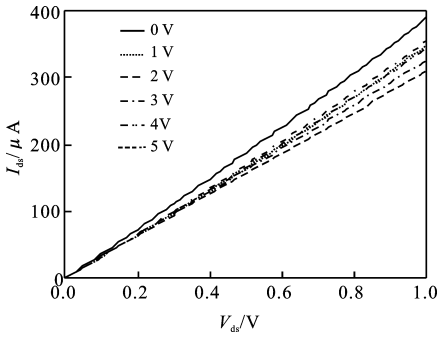
3 结果和讨论

沟道较短器件的电学性能测试结果如图 2 所示. 测试转移特性时, 栅压从 0 V 扫描到 5 V, 漏极电压为 1 V. 跨导曲线为转移特性曲线求微分的结果. 测试输出特性曲线时, 漏压从 0 V 扫描到 1 V, 栅压从 0 V 变化到 5 V, 步长为 1 V. 从图中可以看出, 狄拉克点处的漏极电流为 330 μA . 器件的最大绝对值跨导为 87 μS . 图 3 为沟道较长器件的电学性能. 测试条件同图 2. 从图中可以看出狄拉克点处

的漏极电流为 369 μA . 最大绝对值跨导为 286 μS . 比较图 2 和图 3, 可以看出, 源漏间距相同时, 狄拉克点处的电流差别不是很大, 这一点和参考文献[9]的观点基本一致. 也说明我们的器件均一性较好. 但是, 比较两种器件的跨导发现, 沟道较长的跨导是沟道较短的三倍多, 从输出特性曲线中也能看到, 沟道较长器件的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$ 各条曲线之间的距离明显大于图 2 中 $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$ 各条之间的距离.



(a) 器件的转移特性和跨导曲线



(b) 器件的输出特性曲线

图 2 沟道较短石墨烯晶体管的电学性能

此实验结果和硅器件迁移率公式不相符合, 硅 MOS 晶体管(金属氧化物半导体场效应晶体管)的迁移率公式为:

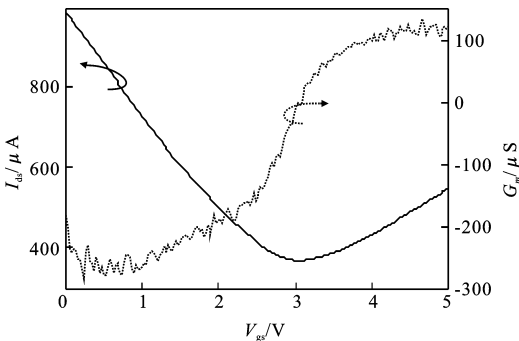
$$\mu = \frac{L}{W} \cdot \frac{g_m}{C_{ox} \cdot V_{ds}} \tag{1}$$

变换以后为:

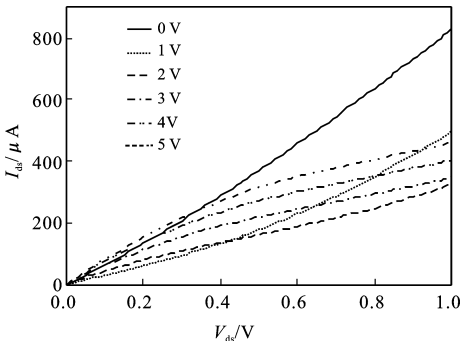
$$G_m = \mu \cdot \frac{W}{L} \cdot C_{ox} \cdot V_{ds} \tag{2}$$

公式(2)中, 跨导和宽长比成正比. 也就是说, 宽长比越大, 跨导越大. 而此实验结果是, 宽长比越大, 跨导越小.

基于以上现象, 我们给出了如下解释. 在沟道宽度和源漏间距相同的情况下, 由于栅压的调制长度不同, 电场感应的电荷多少不同. 在栅压变化时, 感应出来的电荷变化量不同. 栅压调制长度越大, 感应的电荷越多. 在栅压变化量相同时, 调制长度越大, 电荷的变化

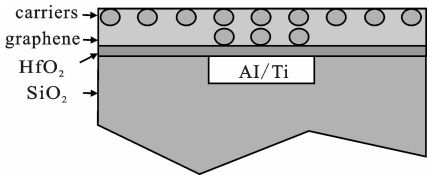


(a) 器件的转移特性和跨导曲线

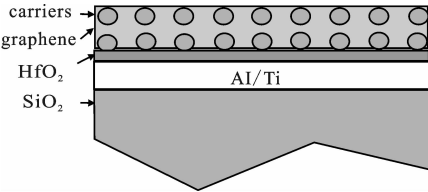


(b) 器件的输出特性曲线

图 3 沟道较长石墨烯晶体管的电学性能



(a) 沟道较短时,栅压对沟道电荷的调制情况



(b) 沟道较长时,栅压对沟道电荷的调制情况

图 4 栅压对沟道电荷调制的示意图

量越大. 示意如图 4 所示. 根据电容公式:

$$Q = C * U \tag{3}$$

$$C = \epsilon * S / d \tag{4}$$

把式(4)代入式(3),得:

$$Q = \epsilon * U * S / d \tag{5}$$

从式(5)可以看出电荷量和面积成正比,沟道宽度相同时,电荷量和长度成正比. 图 2 和图 3 中的跨导和正比例关系略有偏差,可能是因为栅和源漏之间的石墨烯有电阻或者其他因素导致的.

对于和硅 MOS 器件的公式不相吻合的原因,我们认为图 1(a)石墨烯器件不适用于此公式. 硅器

件中,沟道需要栅电压电场效应产生的反型层来形成,栅和源漏之间是自对准的关系. 如果栅和源漏之间有一段距离不被调制,沟道不会把源漏电极连接起来,器件就不能正常工作. 而图 1(a)中,栅和源漏之间有一段石墨烯没有被栅调制到. 由于石墨烯导电,器件可以正常工作.

4 结束语

本文中,发现了石墨烯晶体管中,源漏间距相同,栅的调制区间不同时,跨导大小不同. 栅的调制长度较长时,跨导较大. 我们把此现象归结为电场感应载流子的多少,影响了跨导的大小. 此现象和硅 MOS 晶体管的迁移率公式不相吻合,我们认为栅和源漏之间的石墨烯影响了器件的跨导. 此研究结果有助于加深对石墨烯及其他二维材料晶体管电学性能的认识. 也有助于寻找石墨烯及其他二维材料器件的新应用.

参考文献:

[1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.

[2] Novoselov K S, Falko V I, Colombo L, et al. A roadmap for graphene[J]. Nature, 2012, 490(7419): 192-200.

[3] 陈铖颖,蒋见花,胡晓宇. 一种基于石墨烯霍尔器件的读出电路设计[J]. 微电子学与计算机,2013,30(12): 137-141.

[4] Schwierz F. Graphene transistors: status, prospects, and problems[J]. IEEE, 2013, 101(7): 1567-1584.

[5] Cheng R, Bai J, Liao L, et al. High-frequency self-aligned graphene transistors with transferred gate stacks [J]. National Academy of Sciences, 2012, 109(29): 11588-11592.

[6] Farmer D B, Lin Y-M, Avouris P. Graphene field-effect transistors with self-aligned gates[J]. Applied physics letters, 2010, 97(1): 013103-1-3.

[7] Liao L, Lin Y C, Bao M, et al. High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate[J]. Nature, 2010, 467(7313): 305-308.

[8] Li X, Cai W, An J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils [J]. Science, 2009, 324(5932): 1312-1314.

[9] Nagashio K, Nishimura T, Kita K, et al. Contact resistivity and current flow path at metal/graphene contact[J]. Applied physics letters, 2010, 97 (14): 143514-1-3.

分析,也是今后的研究方向.

参考文献:

[1] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008:112-112.

[2] 鲁锋. 浅谈设备故障分析方法[J]. 冶金自动化,2009,33(1):298-301.

[3] 吕应超. 基于 VC 的故障树分析软件开发与研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.

[4] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.

[5] 刘玘玘,汪妮,解建仓. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(6):756-757.

[6] 张峰,谢振华,程江涛,等. 改进熵系数法的预警机探测引导能力评估[J]. 火力与指挥控制,2015,40(2):161-164.

[7] 张婕,吴振强,霍成义. 基于熵权系数的 BWIP 网络风险评估方法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(15):114-117.

[8] Hsu S S, Lin W Y, Stanley Lee. Group decision making for TOPSIS[C]// Ifsa World Congress & Nafips International Conference. USA: IEEE, 2001(5):2712-2716.

[9] 徐达,李闯,李洋. 基于 TOPSIS 的装备维修性定性指标综合评价研究[J]. 航天控制,2014,32(5):92-96.

[10] 孔庆东. 发动机故障诊断虚拟培训系统的开发[D]. 长春:吉林大学,2015.

作者简介:

饶毅 男,(1993-),硕士. 研究方向为计算机仿真. E-mail:raoyimail@163.com.

徐丙立 男,(1975-),博士,副教授. 研究方向为虚拟地理环境等.

荆涛 男,(1978-),硕士,讲师. 研究方向为人机交互与人机功效.

赵秀玉 女,(1975-),博士,讲师. 研究方向为虚拟环境快速构建.

张飞 男,(1989-),硕士. 研究方向为虚拟现实.

(上接第 27 页)

作者简介:

张庆伟 男,(1980-),博士研究生. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计. E-mail: zqw6868zqw@163.com.

李平 男,(1957-),教授,博士生导师. 研究方向为纳米电子器件与集成电路的研究与设计.

廖永波 男,(1976-),博士,副教授. 研究方向为纳米电子器件与集成电路的研究与设计.

王刚 男,(1981-),博士,讲师. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

曾荣周 男,(1978-),博士研究生. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

王恒 男,(1995-). 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

翟亚红 女,(1981-),博士,副教授. 研究方向为纳米电子器件的研究与设计.