

源漏不对称的石墨烯场效应管特性研究

曾荣周,李 平,廖永波,张庆伟

(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: 石墨烯场效应管(GFET)在栅极和源/漏电极之间存在的不对称的未被栅极覆盖的区域,会引起栅、源和栅、漏电极之间的串联电阻不相等,这将对 GFET 的性能会产生影响.首次测试了源漏不对称 GFET 在互换源、漏电极的情况下的输出特性、转移特性和跨导,并采用带源极负反馈电阻的共源极电路模型和石墨烯沟道总电阻计算公式,分析了源漏不对称对器件特性的影响机理.为研制 GFET 及其他的纳米结构材料晶体管提供了有益的参考.

关键词: 石墨烯场效应管;源漏不对称;un-gated 区域;串联电阻

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)02-0118-04

Study on the Characteristics of Graphene Field-Effect Transistors With Asymmetry Source and Drain

ZENG Rong-zhou, LI Ping, LIAO Yong-bo, ZHANG Qing-wei

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

Abstract: There are asymmetric un-gated regions that give rise to unequal access resistances between the gate and the source/drain (S/D) electrodes in the graphene field effect transistor (GFET), which has a certain effect on the performance to the GFET. For the first time, in this paper, when the source and drain electrodes exchanged, the output characteristics, transfer characteristics and transconductance of the asymmetric GFET are measured respectively. The influence mechanism resulting from the asymmetry Source and Drain is analyzed by using the common source circuit model with source negative feedback resistor and the total resistance equation of graphene channel. It provides a useful reference for preparation and testing of GFETs and other nanostructured material transistors.

Key words: graphene field-effect transistors (GFETs); asymmetrical source drain; un-gated region; access resistance

1 引言

石墨烯是碳原子蜂窝状结构排列的单原子层材料.由于其优异的性能^[1](如非常高的载流子迁移率(高达 200 000 cm²/VS),非常高电流密度,极强的机械性能和较高的热化学稳定性)引起了微电子领域研究人员极大的兴趣.采用石墨烯作为沟道材料的场效应管(石墨烯场效应管:GFET),自 2004 年诞生以来,成为微电子领域最具应用前景的发明之一,是新一代半导体材料发展的希望所在^[2].

目前,GFET 已经在混频器、振荡器、倍频器、接收机和放大器等领域取得了不少的研究和应用成果^[3].

但是,在 GFET 的制备过程中,由于套刻精度、操作技能及其他非可控因素等的影响,采用常规器件结构制备的 GFET,在其栅、源电极之间,栅、漏电极之间,都不可避免地存在未被栅极覆盖(un-gated)的区域,也就是说在栅、源电极之间,栅、漏电极之间都存在一定的间距,且这两个间距可能拥有不同的长度.由于石墨烯的方阻比较大(通常为几百到

几千 $\Omega/\square$)[⁴],导致这两个 un-gated 区域形成串联电阻,且这两个串联电阻的阻值不一定相同.串联电阻是影响 GFET 性能的重要因素之一[⁵⁻⁸].

首先,大的串联电阻会导致 GFET 的驱动电流和跨导下降.不少文献提出了减少串联电阻的方法,其中文献[5]提出对 un-gated 区域掺杂以减小串联电阻;文献[6]中研究了在 un-gated 区域增加两个电容耦合的场控制电极来减小串联电阻的方法;文献[7-8]中研究了采用自对准结构减小串联电阻的方法.

另外,由于栅、源电极之间,栅、漏电极之间都的间距不相等,导致的这两个区域所产生的串联电阻的大小不相等,使得 GFET 产生了源漏不对称特性.那么,即使是在相同的栅电压下,在源、漏电极之间分别施加大小相等而极性不同的电压(即 $V_{DS} = -V_{SD}$),对这种源漏不对称 GFET 进行电学测试,会导致测试结果不相同.这种源漏不对称特性一方面会导致 GFET 的电学特性“不稳定”;另一方面,在使用过程中如果互换源、漏电极,将对由 GFET 构成的模块电路的性能会带来影响.

但目前尚没有针对源漏不对称 GFET 的特性的研究和报道.

因此,本文制备了具备源漏不对称的 GFET,通过实验获取不同的测试结果,从实验的角度验证源漏不对称 GFET 的特性,然后从理论角度分析其影响机理.

2 源漏不对称 GFET 的制备

本文采用自然氧化铝做栅介质,制备具有源漏不对称的埋栅结构 GFET[⁹].图1给出了不对称 GFET 的光学显微图片,图2为存在 un-gated 区域的 GFET 示意图.

所制备的 GFET 的栅长 $4\ \mu\text{m}$,栅宽 $20\ \mu\text{m}$,栅极与 A 端电极的间距为 $3\ \mu\text{m}$,栅极与 B 端电极的间距为 $9\ \mu\text{m}$.由于栅电极与 B 端电极的距离大于其与 A 端电极的距离,使得栅电极与 B 端电极的串联电阻 R_2 大于其与 A 端电极的串联电阻 R_1 ,即 $R_2 > R_1$.即此时的 GFET 从结构到串联电阻,都呈现出不对称特性.

3 源漏不对称 GFET 测试结果

在室温下用 Cascade 探针台、安捷伦 4155B 对所制备的源漏不对称 GFET,进行输出特性和转移特性测试.

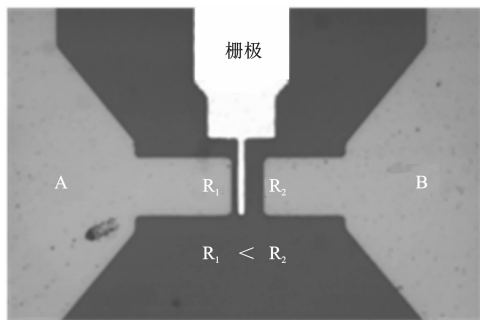


图1 不对称 GFET 的显微图

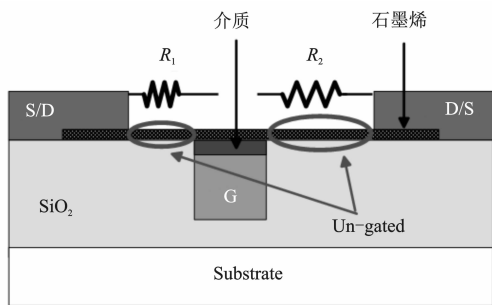


图2 存在 un-gated 区域的 GFET 示意图

首先,当栅极电压(V_{gs})从 0 V 增加到 3 V (步长为 1 V)时,电源电压大小为 1 V ,测试了其输出特性,图3给出了 B 端为漏极时的输出特性曲线,图4是交换源、漏电极后,即 A 端为漏极时的输出特性曲线.可见, $V_{gs}=1\text{ V}$ 和 $V_{gs}=2\text{ V}$ 时候,两者的输出特性出现了较大的差异.

其次,在漏、源电压大小为 1 V 时,交换 GFET 的 A、B 两端之漏、源极性,分别测试了其转移特性曲线,测试结果如图5所示.由图可见,在 $V_{gs} < 1.5\text{ V}$ 时候,在相同的漏源电压下, $I_{ds}(\text{B漏极})$ 比 $I_{ds}(\text{A漏极})$ 大 $50\ \mu\text{A}$ 以上.

最后,图6分别给出了 B 端为漏极、A 端为源极,以及漏、源两极交换之后所测得的跨导特性曲线.可见, B 端为漏极时的跨导总体上比 A 端为漏极时的跨导要大.

总的来说, B 端为漏极时,GFET 的综合性能要优于 A 端为漏极时的情况.而且,从图3~5可以看出 B 端为漏极时 GFET 的最大驱动电流比 A 端为漏极时也稍大一些.

4 不同串联电阻对互换源、漏电极测试结果影响分析

在忽略石墨烯与 A、B 电极间金属接触电阻不同的情况下,图2所示的存在 un-gated 区域的源漏

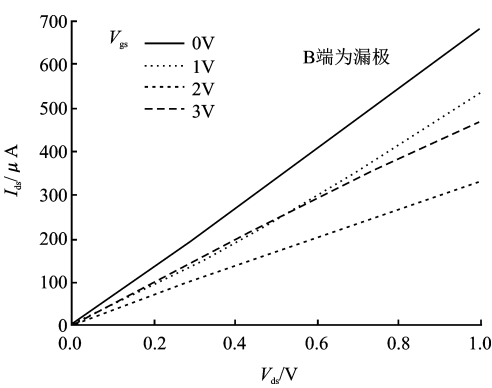


图 3 B 端为漏极时的输出曲线

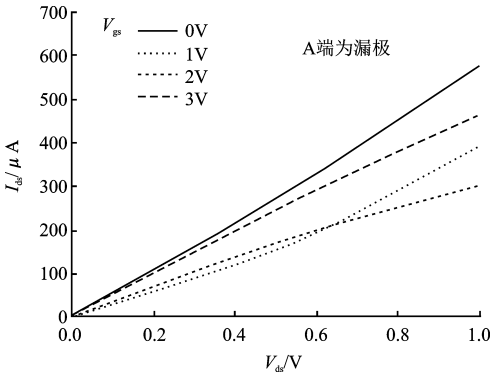


图 4 A 端为漏极时的输出曲线

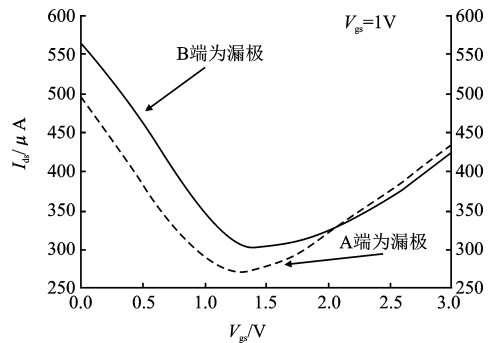


图 5 B 端和 A 端分别为漏极时的转移曲线

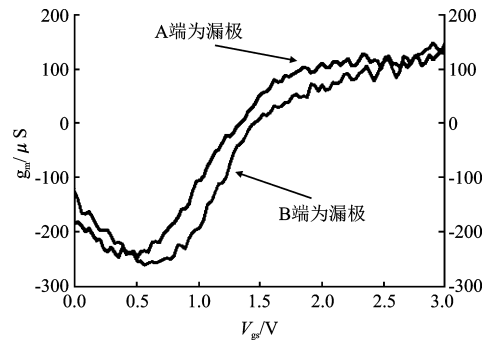


图 6 B 端和 A 端分别为漏极时的跨导曲线

不对称 GFET 示意图,可等效为图 7(a)所示的带源

极负反馈电阻的电路结构,这种带源极负反馈电阻的结构,其跨导值可以采用图 7(b)所示的带源极负反馈电阻的共源极电路来计算. 该跨导的计算公式如式(1)所示, 其中 g_{m0} 是本征跨导(只考虑 gated 区域的跨导), R_s 是源极端的电阻.

$$g_m = \frac{g_{m0}}{1 + R_s g_{m0}} \tag{1}$$

从式(1)可知,GFET 的跨导值主要取决于源端电阻 R_s 和本征跨导 g_{m0} ,漏极电阻 R_D 并不影响跨导值的大小.

对于源漏不对称的 GFET,由于其栅、源电极之间,栅、漏电极之间的不对称特性,导致这两端的串联电阻不一致,即漏、源电极交换后, R_s 随之改变,最终导致两者的跨导值也不一致.

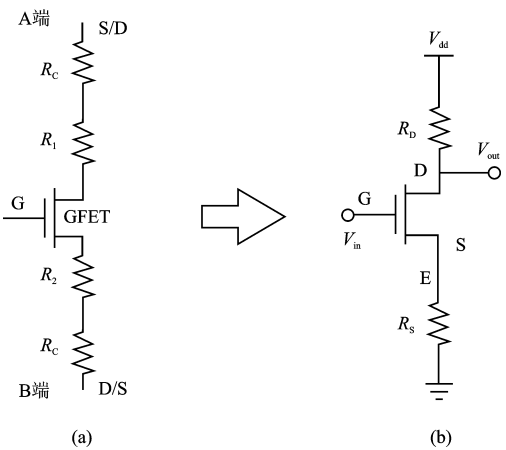


图 7 电路

另外,为了分析沟道总电阻对漏极电流的影响,式(2)给出了石墨烯沟道总电阻计算公式^[10].

$$\begin{aligned} R_{\text{total}} &= R_{\text{contact}} + R_{\text{access}} + R_{\text{channel}} \\ &= R_{\text{contact}} + R_{\text{access}} + \frac{L}{We\mu \sqrt{n^2 + n_0^2}} \end{aligned} \tag{2}$$

式中, R_{contact} 是金属与下方的石墨烯的接触电阻; R_{access} 由 un-gated 区域产生的串联电阻; R_{channel} 被栅电极调制的沟道电阻; L 栅长; W 是栅宽; e 电子电荷; μ 是载流子迁移率; n_0 是残余载流子浓度(最小导电点对应的载流子浓度); n 是由于栅压偏离狄拉克点而引入的载流子浓度.

在本文所涉及的两种交换电极的测试中,尽管接触电阻 R_{contact} 和总的串联电阻 R_{access} 相等,但是 R_s 不相等,所以栅极与源极间的电压 V_{GE} 也不相等,导致由栅电极电压调制的载流子浓度 n 在两种情况下有所变化,从而导致 R_{channel} 的值也发生改变,引起了总电阻 R_{total} 改变,最终使漏极电流也发生变

化,这将进一步导致 g_{m0} 的不同. 而且,由式(1) 可知跨导也会不同.

表 1 给出了漏、源电极交换前后的两种情况下, GFET 的测试结果比较. 可见, B 端为漏极时测试的最大跨导比 A 端为漏极时约高 6%.

表 1 互换源、漏电极的测试结果比较

漏极接 A/B 端	源极负反馈 电阻 R_S	负反馈电阻 大/小	最大 g_m / μS
A	R_2+R_C	大	247.3
B	R_1+R_C	小	261.2

5 结束语

本文制备了具备源漏不对称的 GFET,并测试了漏、源电极互换前后源漏不对称 GFET 的输出特性、转移特性以及跨导,比较了两种情况下性能差别. 并采用带源极负反馈电阻的共源极电路模型和石墨烯沟道总电阻计算公式,分析了不对称的 un-gated 区域对 GFET 特性的影响机理.

本文所观测和分析的 GFET 的源漏不对称特性具有较大的理论和实践意义. 首先,在制备晶体管时要尽量减小 un-gated 区域或消除串联电阻. 其次,可以通过改进器件结构,比如,自对准结构可以把 un-gated 区域的长度缩减到几十纳米,这样几乎消除了串联电阻. 另外,也为以后测试 GFET 和其它纳米结构材料晶体管提供了有益的参考.

参考文献:

[1] SCHWIERZ F. Graphene transistors [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(7): 487-96.

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

[3] MOON J S, SEO H C, ANTCLIFFE M, et al. Graphene FET-Based Zero-Bias RF to Millimeter-Wave Detection [J]. Ieee Electron Device Letters, 2012, 33 (10): 1357-1366.

[4] CHEN W, YAN L. Centimeter-Sized Dried Foam

Films of Graphene: Preparation, Mechanical and Electronic Properties [J]. Advanced Materials, 2012, 24(46): 6229-6233.

[5] RAMON M E, MOVVA H C P, CHOWDHURY S F, et al. Impact of contact and access resistances in graphene field-effect transistors on quartz substrates for radio frequency applications [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(7):23-26.

[6] AL-AMIN C, KARABIYIK M, VABBINA P K, et al. Field controlled RF Graphene FETs with improved high frequency performance [J]. Solid-State Electronics, 2014(95):36-41.

[7] FENG Z H, YU C, LI J, et al. An ultra clean self-aligned process for high maximum oscillation frequency graphene transistors [J]. Carbon, 2014 (75): 249-254.

[8] YEH C-H, LAIN Y-W, CHIU Y-C, et al. Gigahertz Flexible Graphene Transistors for Microwave Integrated Circuits [J]. Acs Nano, 2014, 8 (8): 7663-7670.

[9] ZENG R, LI P, WANG G, et al. An embedded gate graphene field-effect transistor with self-oxidized Al2O3 dielectrics [C]proceedings of the 2016 International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), Hatfield, UK. 2016.

[10] KIM S, NAH J, JO I, et al. Realization of a high mobility dual-gated graphene field-effect transistor with Al2O3 dielectric [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(6):666.

作者简介:

曾荣周 男,(1978-),博士. 研究方向为纳米电子器件. E-mail:rongzhou_zeng@126.com.

李 平 男,(1957-),教授,博士生导师. 研究方向为纳米电子器件、功率器件、FPGA 设计与测试、SOC 设计与验证.

廖永波 男,(1976-),副教授. 研究方向为石墨烯晶体管、高性能数字和混合信号 IC(集成电路)的分析、建模和设计、FPGA 设计与测试.

张庆伟 男,(1981-),博士. 研究方向为纳米电子器件.