

基于石墨烯谐振沟道晶体管的高频纳米机电系统 信号读取研究*

徐跃杭[†] 国云川 吴韵秋 徐锐敏 延波

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

(2010年12月10日收到; 2011年3月22日收到修改稿)

结合石墨烯场效应晶体管和机械谐振原理, 研究了基于本地背栅石墨烯谐振沟道晶体管 (RCT) 的高频机械信号直接读取方法. 利用机械剥离法获得的石墨烯, 提出了一种基于刻蚀技术的器件制备方法, 并实现了栅长和栅宽分别为 $1\ \mu\text{m}$ 的本地背栅 RCT. 实验结果表明, 在室温下 RCT 的谐振频率范围为 57.5—88.25 MHz. 研究结果对加速石墨烯纳米机电系统和高频低噪声器件的应用有着重要作用.

关键词: 石墨烯, 谐振沟道晶体管, 纳米机电系统

PACS: 07.10.Cm, 85.40.-e, 85.35.-p

1 引言

2004年, Geim等^[1]在美国科学杂志首次报道了石墨烯(Graphene)(单原子层石墨)具有量子Hall效应, 成为目前继碳纳米管(CNT)后纳米器件领域的热门材料^[2-4]. 由于石墨烯纳米级的物理尺寸、优秀的电性能和机械性能, 使其非常适用于纳米机电系统(NEMS), 可广泛应用于高灵敏度质量、应力和生物传感器, 以及无线通信系统中的高 Q 器件. 2007年, 康奈尔大学Bunch等^[4]报道了首个石墨烯机械谐振器, 并采用光学方法读取得到其谐振频率在MHz频段. 然而由于NEMS器件的机械信号与电信号的换能器尺寸进一步缩小, 给机械信号读取带来了挑战. 目前主要的读取方法有光学法^[4]、机械法^[5]、磁力作用法^[6]、单电子晶体管法^[7]和量子点接触法^[8]等. 然而这些方法由于需要特殊设备或者复杂的器件结构, 不适合实际电路应用. 2004年, 康奈尔大学Sazonova等^[9]利用CNT的跨导特性和混频技术实现了全电学读取方法, 大

大简化了NEMS机械信号的读取. 2009年, 哥伦比亚大学Chen等^[10]采用全背栅结构机械谐振器和混频技术实现了全电学读取石墨烯机械谐振器, 并研究了石墨烯机械谐振器在质量传感器上的应用, 展示了石墨烯机械谐振器在传感器领域的应用潜力.

简单、快速的电学读取系统是石墨烯NEMS应用到实际电路系统的基础, 利用混频方法不仅读取速度较慢, 而且由于难以获得准确的幅度和相位信息而无法应用于实际高频器件和电路(如滤波器、振荡器等). 2010年Xu等^[11]采用直接剥离技术法获得的本地背栅石墨烯谐振沟道晶体管(RCT), 在低温下实现了全电学读取石墨烯谐振器高频机械信号. 然而由于利用直接剥离技术获得器件的成品率较低, 并且器件中的石墨烯通常为两层以上, 使得器件跨导较低, 以致只能在高度真空和低温下才能测得机械谐振信号. 本文采用机械剥离技术获得的单层石墨烯, 通过转移技术和刻蚀法制备了单层石墨烯背地背栅RCT, 在室温下实现了

* 国家自然科学基金(批准号:60876052, 61106115)资助的课题.

[†] E-mail: yhxu@ee.uestc.edu.cn

全电学高频机械信号读取.

2 原理

2.1 机电效应分析

本地背栅 RCT 的横截面如图 1(a) 所示, 其栅极位于石墨烯的正下方, 源、漏电极作为石墨烯的支撑. 石墨烯和支撑电极之间依靠 van der Waals 力吸附. 器件激励采用栅极射频 (RF) 信号 $V_g^{RF} = v_{in} \cos(\omega t)$ ($\omega = 2\pi f$ 为输入 RF 信号的角频率) 对石墨烯梁所产生的周期性静电力实现. 在一定栅极直流 (DC) 偏置 (V_{gs0}) 下 (如图 1(b) 所示), 石墨烯梁所受的静电力可以表示为

$$\begin{aligned} F_{el} &= 1/2 \frac{\partial C_g}{\partial z} (V_{gs0} + v_{in} \cos(\omega t))^2 \\ &\cong \frac{\varepsilon_0 A}{2z_0^2} V_{gs0}^2 + \frac{\varepsilon_0 A}{z_0^2} V_{gs0} v_{in} \cos(\omega t) \\ &= F_s + F_d \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $z = z_0 - \Delta z$ 为栅极与石墨烯 (沟道) 之间的距离, z_0 为石墨烯梁平衡时的栅极与沟道之间距离, Δz 为石墨烯梁的挠度, C_g 为栅极与沟道形成的电容, ε_0 为自由空间介电常数, A 为栅极与沟道的正面投影面积, F_s 和 $F_d \cos(\omega t)$ 分别表示静态和时变静电力分量. 静态静电力用于调节石墨烯梁的静态张力, 时变静电力则作为时变驱动信号, 从而使得石墨烯梁在不同的张力下做周期性振动.

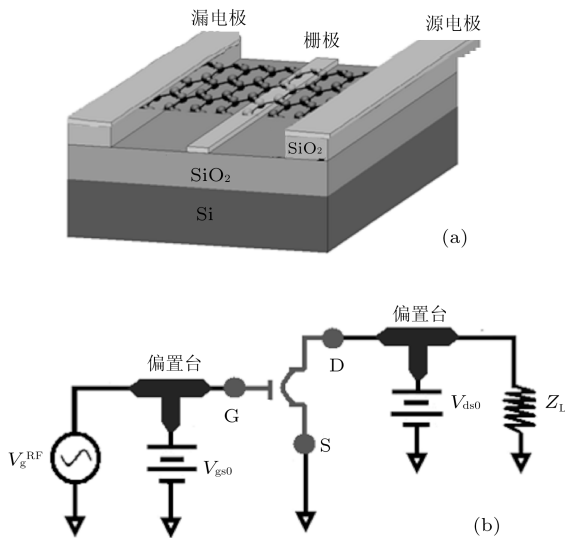


图 1 (a) 石墨烯 RCT 横截面示意图; (b) 器件工作原理框图

简谐振动下, 石墨烯梁的挠度可以简单表示为

$$\Delta z = \frac{F_d/K}{1 - \omega^2/\omega_r^2 + j\omega/(Q\omega_r)}, \quad (2)$$

其中 K 为等效弹性系数, $\omega_r = 2\pi f_r$ 为机械谐振角频率, Q 为机械谐振器的品质因素. 在一定张力 (T) 下石墨烯固支架的振动频率为^[4]

$$f_r = \sqrt{\left(a \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \frac{d}{L^2} \right)^2 + \frac{0.57a^2 T}{\rho L^2 w d}}, \quad (3)$$

其中 E 为杨氏模量, ρ , d , w 和 L 分别为石墨烯的质量密度、厚度、宽度和长度, 固支常数 $a = 1.03$. 考虑到

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{eff}}}, \quad (4)$$

可求得等效弹性系数为^[12]

$$K = 0.735 L w d \rho \omega_r^2. \quad (5)$$

2.2 RCT 放大器原理

图 2 为石墨烯 RCT 放大器工作原理示意图. 当 RCT 偏置电压为 (V_{gs0} , V_{ds0}) 时, 在栅极射频输入正弦电压 (V_{in}^{RF}) 的激励下, RCT 源漏电流 (I_{ds}) 的幅度也呈现正弦变化, 改变的幅值 (δI_{ds}) 与 V_{in}^{RF} 的幅值有关. 在负载 R_L 一定的情况下, 输出 RF 电压为 $V_{out} = \delta I_{ds} R_L$. 当 V_{in}^{RF} 的频率与石墨烯固支架谐振频率接近时, 石墨烯梁开始共振, 此时 I_{ds} 的改变幅度由原来的 δI_{ds} 变为 δI_{dsMR} ($\delta I_{dsMR} > \delta I_{ds}$), 因此输出电压相应变为 $V_{outMR} = \delta I_{dsMR} R_L$. 可见, 由于机械谐振的影响, 石墨烯 RCT 的输出信号被放大, 因此本文称该方法为放大器原理.

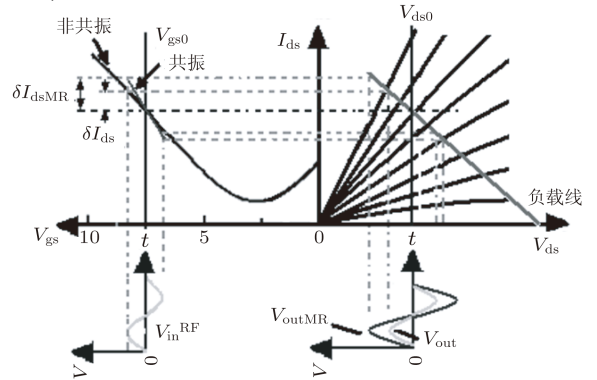


图 2 石墨烯 RCT 放大器工作原理示意图

当栅极输入电压 $V_g = V_{gs0} + V_g^{RF}$ 时, 令栅极与源漏电极之间总耦合电容 $C = C_{gs} + C_{gd} + C_g$ (C_{gs} 和 C_{gd} 分别为栅源和栅漏之间的寄生电容), 则漏

端总输出 RF 电流 $I = I_{gc} + I_{ds}$, 其中 I_{gc} 表示栅极耦合电容 C 产生的 RF 电流, I_{ds} 表示由于石墨烯晶体管效应产生的 RF 电流. 其中 I_{gc} 可以表示为

$$\begin{aligned} I_{gc} &= dQ/dt \\ &\cong CdV_g^{RF}/dt + V_g^{DC}dC_g/dt. \end{aligned} \quad (6)$$

令 $C'_g = dC_g/dz$, 则

$$\begin{aligned} I_{gc} &= C(dV_g^{RF}/dt) + V_g(dC_g/dz) \cdot (dz/dt) \\ &= C(dV_g^{RF}/dt) + V_g C'_g(dz/dt), \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式的第一项为栅极电容耦合 RF 电流, 第二项为石墨烯梁周期性振动过程使得电容值发生周期性变化而产生的 RF 电流, 该项为传统微机电系统 (MEMS) 读取方法所提取的信号. 然而在 NEMS 系统中由于换能器物理尺寸进一步减少, 使得输出机械信号幅度也相应减小, 以致较难利用电容耦合技术直接读取机械信号 [11]. 因此本文只关心由于石墨烯晶体管效应产生的 RF 电流 I_{ds} , 可以表示为

$$I_{ds}^{RF} = v_{gs}g_m \exp(j\omega\tau) + v_{gs}V_g \frac{\Delta z}{z_0} g_m \exp(j\omega\tau), \quad (8)$$

其中 g_m 为 RCT 的跨导, 把 (2) 和 (5) 式代入 (8) 式可得

$$\begin{aligned} I_{ds}^{RF} &= v_{gs}g_m \exp(j\omega\tau) \left[1 + \frac{V_g^2 \varepsilon_0 A}{0.735Lwd\rho(2\pi f_r)^2 z_0^3} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 + j\frac{1}{Q} \frac{f}{f_r} \right)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

对于固定的负载 Z_L , 在晶体管产生的电流远大于背景噪声电流下, 机械谐振信号增益可以定义为

$$\begin{aligned} G &= 20 \log \left| \frac{V_g^2 \varepsilon_0 A}{0.735Lwd\rho(2\pi f_r)^2 z_0^3} \right. \\ &\quad \left. \times \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 + j\frac{1}{Q} \frac{f}{f_r} \right)} \right|, \end{aligned} \quad (10)$$

当 $f = f_r$ 时, 器件具有最高增益

$$G_{\max} = 20 \log \left| \frac{V_g^2 \varepsilon_0 A Q}{0.735Lwd\rho(2\pi f_r)^2 z_0^3} \right|. \quad (11)$$

由 (11) 式可见, 对于固定尺寸和结构的 RCT, 机械谐振信号最高增益与机械谐振频率成反比, 与 Q 值

和栅偏压成正比.

3 器件制备

采用直接剥离技术获得的器件, 虽然可获得无化学药品污染的石墨烯 RCT, 但其成品率较低 [11,13]. 为实现批量制备, 本文研究了基于刻蚀法制备本地背栅 RCT 的方法. 在全背栅结构 RCT 的制备过程中, 石墨烯可以直接在 Si/SiO₂ 衬底上机械剥离获得, 然后通过制作源漏电极和刻蚀石墨烯下的 SiO₂ 获得器件. 而本地背栅结构器件则需把石墨烯悬置在栅极的正上方, 因此需要把栅极埋在 SiO₂ 里面, 并对机械剥离获得的石墨烯进行转移. 此外, 由于机械剥离获得的石墨烯形状通常不规则, 使得机械谐振时存在多模现象, 不利于器件特性分析, 因此本文对石墨烯进行了构形.

刻蚀法制备本地背栅 RCT 的主要步骤有: 1) 栅电极制作; 2) 石墨烯制备及其转移; 3) 石墨烯构形; 4) 源、漏电极制备和石墨烯的悬置. 具体步骤如图 3 所示. 栅电极制作采用标准的光刻技术, 即在 SiO₂(100 nm)/Si 衬底上先旋涂一层光刻胶 (PR), 然后把器件放在印有所需栅电极外形的掩膜下曝光, 显影后采用热蒸发蒸上铬 (Cr) 1 nm/金 (Au) 20 nm, 分离 (lift-off) 后即到所需栅电极. 在栅电极制作完成后, 通过热生长 200 nm SiO₂ 把栅电极埋在 SiO₂ 中间, 获得制作 RCT 的本地背栅衬底. 接着, 通过转移技术把石墨烯从 SiO₂/Si 衬底转移到本地背栅衬底, 并置于本地背栅的上方. 最后, 通过石墨烯构形、制作漏源电极和 SiO₂ 刻蚀剂 (BOE) 刻蚀得到石墨烯 RCT.

由于机械剥离法制备的石墨烯面积较小, 因此如何精确转移到本地背栅正上方是制作 RCT 的重要步骤. 石墨烯转移技术的主要流程为 (如图 4 所示):

- 1) 在已制备石墨烯的芯片上旋涂一层电子束光胶 (PMMA);
- 2) 把芯片放入氢氧化钾 (KOH) 溶液里面刻蚀 SiO₂, 刻蚀完后沾有石墨烯的 PMMA 将浮于液体表面;
- 3) 用玻璃把 PMMA 从 KOH 里面转移到清水里面;

4) 利用本地背栅芯片把 PMMA 从水里捞起, 并在显微镜下利用玻璃针挪动 PMMA(和石墨烯), 直到石墨烯位于本地栅正上方为止.

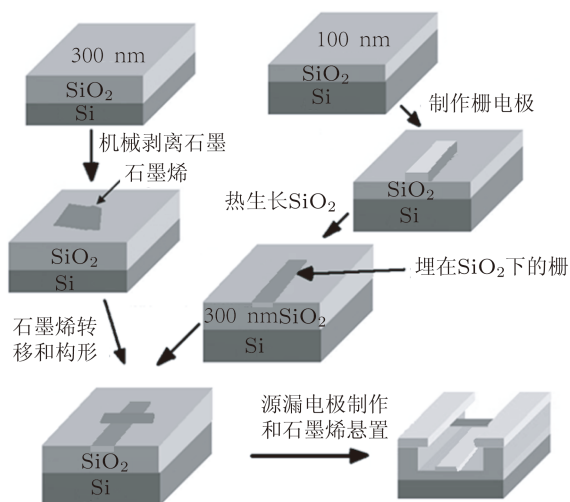


图3 刻蚀法制备石墨烯 RCT 流程

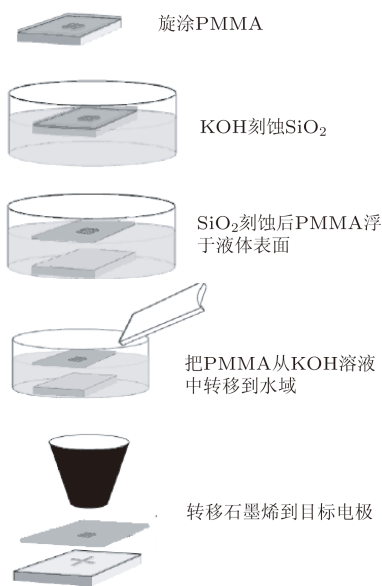


图4 石墨烯转移流程

图 5(a) 为在 SiO_2 表面通过机械剥离法获得的石墨烯在光学显微镜下的照片. 可见单层石墨烯的其中一边长约为 $23 \mu\text{m}$, 由于 SiO_2 厚度并非准确的 $300 \mu\text{m}$, 以及水、PMMA 等杂质的影响, 其单层石墨烯颜色不呈粉红色, 但仍可以通过不同的色度分辨出单层石墨烯. 图 5(b) 为利用上述转移技术把石墨烯从 SiO_2/Si 衬底上转移到栅电极衬底后的光学显微镜照片. 可见本文的转移技术能较为精确地把石墨烯转移到所需的位置. 图 6 为利用刻蚀法制

备的石墨烯 RCT 原子力显微镜 (AFM) 图片, 其中悬置的石墨烯如图中所示.

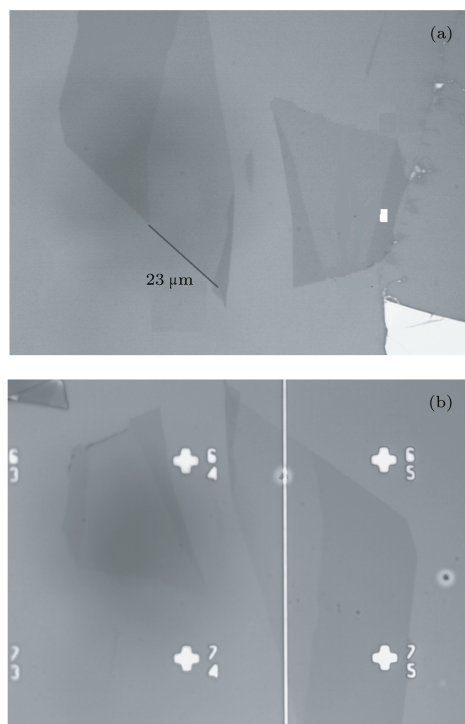


图5 机械剥离制备石墨烯光学显微镜照片 (a) 普通的 SiO_2/Si 衬底上的单层石墨烯; (b) 转移到栅电极衬底后的石墨烯

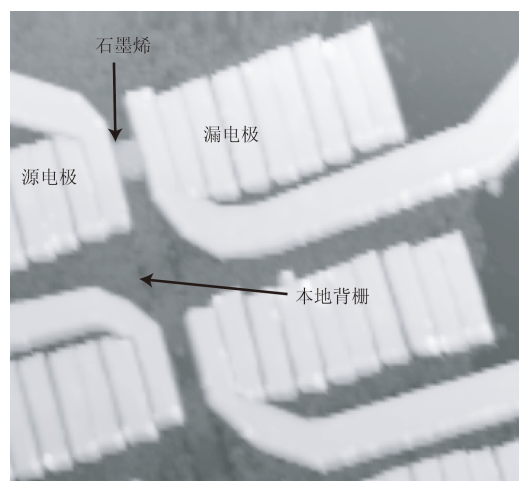


图6 刻蚀法制备的本地背栅石墨烯 RCT AFM 图片

4 器件测试与结果分析

为减少外部寄生参数 (芯片载体、同轴接口等) 的影响, 提高输出信号的信噪比, 本文对本地背

栅石墨烯 RCT 采用真空载片测试台 (vacuum probe station) 测量. DC 测试原理框图如图 7(a) 所示, 锁定放大器采用 SR830. RF 测试原理如图 7(b) 所示. RCT 的激励和读取都通过矢量网络分析仪 (VNA) 实现, 从而简化了测试电路.

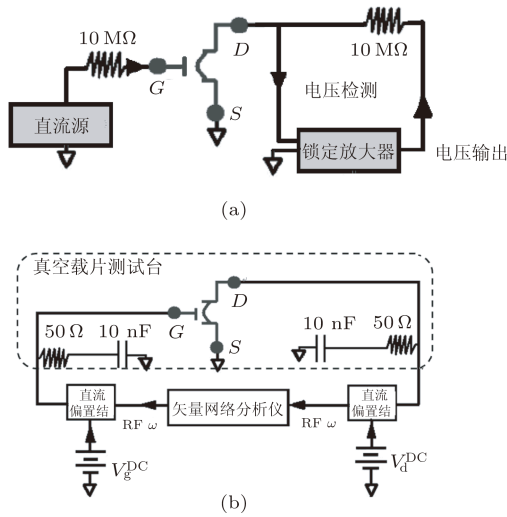


图 7 本地背栅 RCT 测试原理 (a) DC 测试; (b) RF 测试

图 8 为本地背栅石墨烯 RCT 的栅压 (V_g^{DC}) 相关 DC 测试结果, 源、漏间单层石墨烯尺寸为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$. 由图 8(a) 可知, 当栅压从 0 V 变到 10 V 时, 器件的电导 (G) 从 0.156 mS 变到 0.232 mS; 当栅压从 0 V 变到 -10 V, 器件的电导从 0.156 mS 变到 0.252 mS, 可见器件呈现双极特性. 石墨烯双极传输特性是由其材料本身独特的能带结构决定, 即导带和价带相交于第一 Brillouin 区的 6 个顶点上, 且在 Dirac 点附近, 石墨烯中电子的能量 E 与波矢 k 成线性关系: $E(k) = \pm v_F \hbar k$, 其中 v_F 为 Fermi 速度, \hbar 为 Boltzmann 常数. 因此, 通过偏压调节石墨烯中 Fermi 能级 (E_F) 的位置即可获得不同的传输特性. 假设器件中石墨烯的 Dirac 点在栅压为零处, 则当栅压为正时, 器件的载流子为电子, 而栅压为负时, 器件的载流子为空穴, 且载流子浓度随 $|V_g^{DC}|$ 的增加而增大. 由于石墨烯的电导率 $\sigma = q^2 v_F l_e N_{2D}$, 其中 q 为单位电荷, l_e 为等效平均自由程, N_{2D} 为石墨烯中载流子浓度, 因此器件的电导可通过栅压进行调制, 并且呈现双极特性. 器件的电导随栅压的变化率 (dG/dV_g) 如图 8 (b) 所示, 由图可知器件 dG/dV_g 最大可达 $0.15 \text{ mS} \cdot \text{V}^{-1}$, 可见单层石墨烯 RCT 具有较高的跨导, 在晶体管

放大器方面有较大的应用潜力.

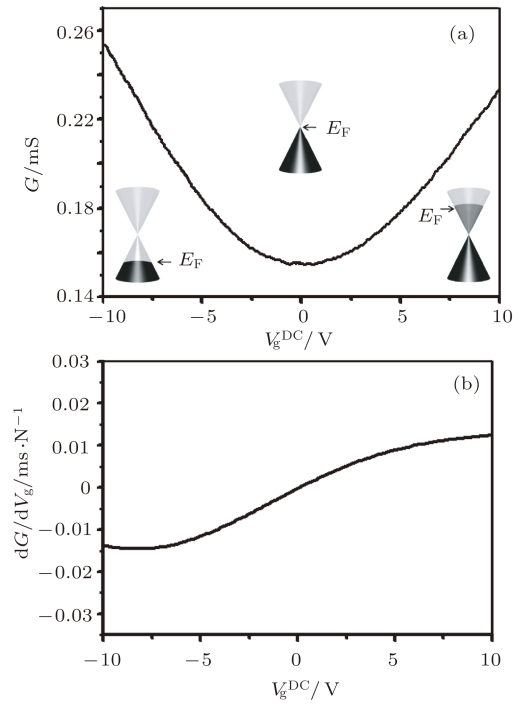


图 8 本地背栅 RCT DC 测试结果 (a) 栅压相关电导特性; (b) 电导变化率与栅压的关系

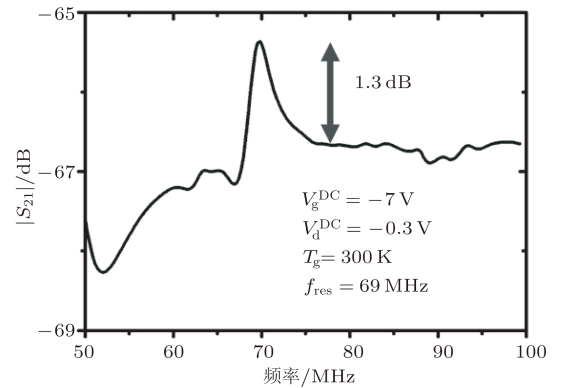


图 9 偏置电压为 $V_g^{DC} = 7 \text{ V}$ 和 $V_d^{DC} = -0.3 \text{ V}$ 时本地背栅器件 RF 测试结果

本文对该器件进行 RF 测试的条件为: 室温 300 K, 真空度为 10^{-2} Torr ($1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$). 图 9 为该器件在 DC 偏置 $V_g^{DC} = -7 \text{ V}$ 和 $V_d^{DC} = -0.3 \text{ V}$, 矢量网络分析仪 (VNA) 输出功率为 -10 dBm 时的 RF 测试结果, 其中 VNA 的测试范围为 50 MHz 到 100 MHz (采样点数 $N = 401$). 由图可知 RCT 机械谐振频率为 69 MHz, 测得的响应 (S_{21}) 幅度与背景信号幅度间的差值为 1.3 dB. 由于驱动功率较大, 器件的谐振状态为非线性谐振, 另外由于受真空度较低、温度较高等因素的影响, 器件谐振的 Q 值较低.

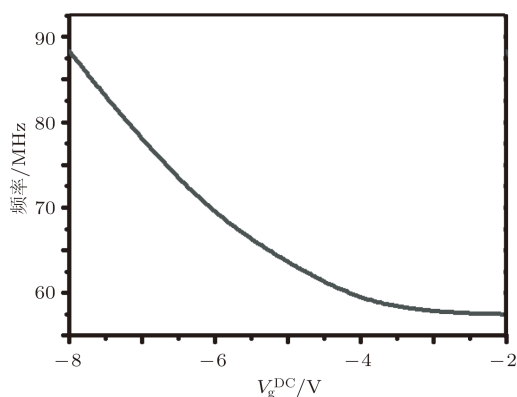


图 10 $V_d^{\text{DC}} = -0.3 \text{ V}$ 下机械谐振频率的栅压调谐特性

由 (1) 和 (3) 式可知, 器件的谐振频率与石墨烯梁的张力相关, 而静态张力可以通过栅压进行调节, 因此石墨烯机械谐振器的频率可以通过栅压进行调谐. 图 10 为石墨烯 RCT 的栅压调谐特性 ($V_d^{\text{DC}} = -0.3 \text{ V}$), 可见器件的谐振频率在 -2 V 到 -8 V 之间的调谐范围为 $57.5\text{--}88.25 \text{ MHz}$, 调谐范围大于 40%. 采用已知石墨参数 $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$

和 $E = 1.0 \text{ TPa}$, 以及器件中石墨烯的物理尺寸 $d = 0.3 \text{ nm}$, $L = 1 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $w = 1 \text{ }\mu\text{m}$ 计算得到的张力范围为 $3.8\text{--}9 \text{ nN}$, 可见本文制备器件中石墨烯梁具有较小的内建张力 [4].

5 结论

研究了本地背栅石墨烯 RCT 器件制备、工作机理和测试技术, 利用刻蚀法制备了石墨烯 RCT, 为石墨烯 NEMS 的批量制备提供了技术方案. 在室温下实现了石墨烯机械谐振器的高频机械信号的直接电学读取, 为石墨烯 NEMS 在实际电路中的应用奠定了良好的基础. 此外, 由于单层石墨烯具有极高的跨导, 以及机械谐振器高 Q 值等特性, 可用于研制超低噪声高频放大器.

感谢美国哥伦比亚大学 James Hone 教授和 Philip Kim 教授对本文工作的帮助.

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [2] Lee C, Wei X D, Kysar J W, Hone J 2008 *Science* **321** 385
- [3] Schwierz F 2010 *Nature Nanotechnol.* **5** 487
- [4] Bunch J S, van der Zande A M, Frank I W, Tanenbaum D M, Parpia J M, Craighead H G, McEuen P L 2007 *Science* **315** 490
- [5] Garcia-Sanchez D, van der Zande A M, Paulo A S, Lassagne B, McEuen P L, Bachtold A 2008 *Nano Lett.* **8** 1399
- [6] Husain A, Hone J, Postma H W C, Huang X M H, Drake T, Barbic M, Scherer A, Roukes M L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1240
- [7] Knobel R G, Cleland A N 2003 *Nature* **424** 291
- [8] Poggio M, Jura M P C, Degen L, Topinka M A, Mamin H J, Goldhaber, Gordon D, Rugar D 2008 *Nature Phys.* **4** 635
- [9] Sazonova V V, Yaish Y, Ustunel H, Roundy D, Arias T A, McEuen P L 2004 *Nature* **431** 284
- [10] Chen C Y, Rosenblatt S, Bolotin K L, Kalb W, Kim P, Kymissis I, Stormer H L, Heinz T F, Hone J 2009 *Nature Nano.* **4** 861
- [11] Xu Y H, Chen C Y, Deshpande V V, DiRenno F A, Gondarenko A, Heinz D B, Liu S M, Kim P, Hone J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 243111
- [12] Ekinci K L, Rouke M L 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76**
- [13] Li Q, Cheng Z G, Li Z J, Wang Z H, Fang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097307

Electrical read out of nano-electromechanical system signal by using graphene resonant channel transistor*

Xu Yue-Hang[†] Guo Yun-Chuan Wu Yun-Qiu Xu Rui-Min Yan Bo

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 16 December 2010; revised manuscript received 22 March 2011)

Abstract

The direct radio frequency read out method based on local back-gate graphene resonant channel transistor (RCT) is studied by combining the operation principles of graphene field-effect transistor and mechanical resonator. A novel method of fabricating local gate graphene RCT is proposed, and a graphene RCT with $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ dimension channel is realized based on exfoliation graphene. The measured resonant frequency of graphene RCT is in a range of 57.5–88.25 MHz at room temperature. This work is useful to pave the way of graphene application to Nano-electromechanical system and high frequency low-noise amplifier.

Keywords: graphene, resonant channel transistor, nano-electromechanical system

PACS: 07.10.Cm, 85.35.-p, 85.40.-e

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60876052, 61106115).

[†] E-mail: yhxu@ee.uestc.edu.cn