

# 强耦合串联石墨烯纳米机械振子

汪开龙

中国科学技术大学,中国科学院量子信息重点实验室,合肥 230026

收稿日期:2019-04-05;接收日期:2019-05-28

**【摘要】** 与微米机械振子相比,纳米机械振子使用纳米级材料制备,尺寸更小,质量更轻,它作为探测器,在探测力、质量等物理量时拥有更高的灵敏度. 石墨烯有高强度、低密度等优良的机械特性,被认为是制备纳米机械振子的理想材料. 基于其制备的石墨烯纳米机械振子有着高谐振频率、高品质因子和谐振频率可调性高等优势,对于纳米力学的基础研究和应用都具有重要的意义. 本文利用微纳加工工艺(包括电子束曝光、电子束蒸发镀膜、反应离子刻蚀和微米级定点干法转移技术)制备了串联石墨烯纳米机械振子样品,并在极低温下(10 mK)测量了石墨烯机械振子的机械性质,实现两个串联石墨烯纳米机械振子的强耦合,耦合强度为 1.34 MHz,协同系数  $C = 399$ .

**关键词:** 石墨烯纳米机械振子,微纳加工工艺,耦合强度,协同系数,强耦合

**PACS:** 81.07.Oj,81.05.ue,81.16.c

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.02.003

## Strong Coupling of Graphene Nanoelectromechanical Resonators in the Chain

WANG Kailong

CAS Key Laboratory of quantum information, University of Science & Technology China, Hefei, 230026, China

Received date: 2019-04-05; accepted date: 2019-05-28

**【Abstract】** Comparing to microelectromechanical resonators, nanomechanical resonators, fabricated with nanomaterials, have smaller size, lighter weight and higher sensitivity. Because of its high strength and low density, graphene is considered as an ideal candidate to host nanoelectromechanical resonators. Taking the advantages of high and tunable resonant frequency, high quality factor, graphene nanoelectromechanical resonators attracts significant interests in both nanoscale mechanics study and applications. Here we fabricated graphene nanoelectromechanical resonators (GNEM) in a chain using micro and nanofabrication technique, including electron beam lithography, electron beam evaporation, reactive ion etching and microscale deterministic dry transfer technique, and measured the properties of the GNEM at ultra low temperature(10 mK), achieving strong coupling regime of GNEMs with a coupling strength of 1.34 MHz and cooperativity of 399.

**Keywords:** Graphene nanoelectromechanical resonators, Micro and Nanofabrication, Coupling strength, Cooperativity, Strong coupling

**PACS:** 7460,7490,0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.02.003

**Reference method:** WANG Kailong, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0097 (2019)

## 1 引言

纳米机械振子中的声子态可以作为信息传递的载体<sup>[1-4]</sup>,使得纳米机械振子成为近年来量子信息科学研究的重要对象.在机械振动模式之间实现信息传递,需要不同振动模式之间相互耦合<sup>[5-7]</sup>.实验上已报道了基于碳纳米管(CNT)<sup>[8]</sup>、二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)<sup>[9]</sup>等材料的单个机械振子中不同模式之间的耦合,以及基于砷化镓(GaAs)等材料近邻振子的耦合.石墨烯因其自身高强度、低密度等优良机械特性,被认为是制作纳米机械振子的理想材料<sup>[10]</sup>.目前,国际上已经报道了串联石墨烯纳米机械振子之间的强耦合,协同系数 $C=44$ .本文在之前的研究基础之上通过优化工艺,利用长条石墨制备串联石墨烯纳米机械振子,实现了近邻石墨烯纳米机械振子的强耦合,利用频率调制的测量方法,获得了协同系数 $C=399$ ,为声子态的相干操作奠定了基础.

## 2 石墨烯纳米机械振子样品制备

石墨烯(Graphene)是一种由碳原子按六方晶格结构排布构成的二维碳纳米材料,它有着高强度、低密度的性质,被认为是制作纳米机械振子的理想

的材料<sup>[10]</sup>.制备悬浮的石墨烯纳米机械振子的工艺可分成自上而下(Top Down)和自下而上(Bottom Up)两类.Top Down的方式是先把石墨转移到衬底上,然后在石墨下方制备凹槽使石墨悬浮;Bottom Up的方式是先通过镀膜或刻蚀工艺把有落差的电极制备好(如图1所示),再把石墨转移到制备好的电极上,使石墨悬浮.在Bottom Up的制备方式中,石墨悬浮工艺是最后通过干法转移完成,石墨烯本身不会被之前的加工工艺污染.因此,本文采用Bottom Up的方式制备石墨烯纳米机械振子.

Bottom Up方式中制备有落差的电极可以利用蒸镀不同厚度的电极来实现<sup>[5]</sup>,使用该方式制备悬浮高度为200 nm的石墨烯纳米机械振子共三步,第一步是制备栅极电极(50 nm);第二步制备源漏电极(250 nm),形成有落差(200 nm)的电极,如图1(a)所示;第三步干法转移石墨,使之悬浮在栅极之上.由于源漏电极和衬底之间也会出现落差(250 nm),导致石墨和衬底界面存在空隙,不能紧密接触,给干法转移石墨带来困难.也可以采用如图1(b)所示的方案,利用干法刻蚀的工艺来制备有落差(200 nm)的电极<sup>[11]</sup>,减少源漏电极和衬底之间的落差(50 nm),提高干法转移石墨的成功率.

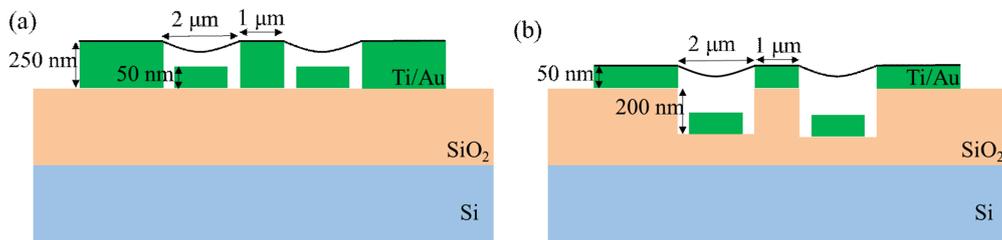


图1 Bottom Up方式中利用(a)镀膜工艺和(b)刻蚀工艺制备有落差的电极剖面示意图

我们设计的串联石墨烯纳米机械振子剖面示意图如图1(b)所示,长条石墨悬浮在栅极电极(Ti/Au=5/45 nm)之上,长条石墨到栅极的悬浮高度约为200 nm,源漏电极之间的距离为2  $\mu\text{m}$ .石墨烯纳米机械振子的谐振频率和石墨条带的长度呈负相关的关系<sup>[10]</sup>,本文中设计的机械振子的结构谐振频率约百兆赫兹.样品电子显微镜照片如图2(a)所示,R1和R2是两个石墨烯机械振子,条状石墨的宽度约1.3  $\mu\text{m}$ .同时为了验证石墨烯是否悬浮,我们拍摄了样品侧视电子显微镜照片,如图2(b)所示.

在石墨烯纳米机械振子的样品微纳加工中,本文使用了电子束曝光(Electron Beam Lithography,

EBL)、反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE)和电子束蒸发镀膜(Electron Beam Evaporation)等工艺.样品的制备流程可以分成三步,第一步是制备刻蚀结构,第二步是制备电极结构,第三步是干法转移条状石墨.前两步的工艺步骤的示意图如图3所示.

第一步制备刻蚀结构.本文使用的电子束胶为高分辨率的950 K PMMA A4胶(溶质分子量950 K;溶质PMMA;溶质含量4%).如图3(a)所示,使用匀胶机把电子束胶均匀的涂抹在衬底上(转速4000 r/min,厚度约200 nm,180  $^{\circ}\text{C}$ 烘烤5 min),再使用电子束曝光,曝光刻蚀结构的图形.曝光完成后,用显影液(甲基异丁酮:异丙醇=1:3(MIBK

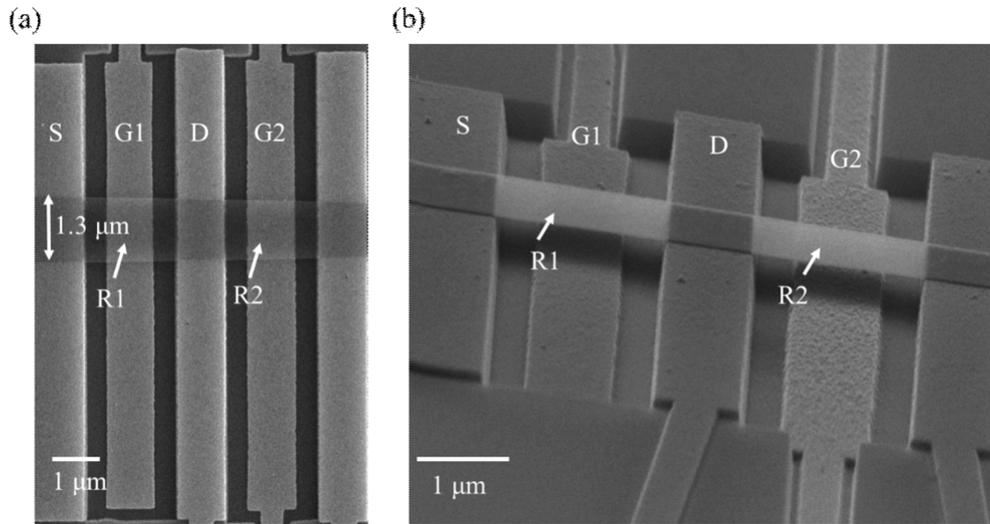


图 2 (a)串联石墨烯纳米机械振子扫描电镜(Scanning Electron Microscope,SEM)照片;(b)石墨烯纳米机械振子侧视 SEM 照片

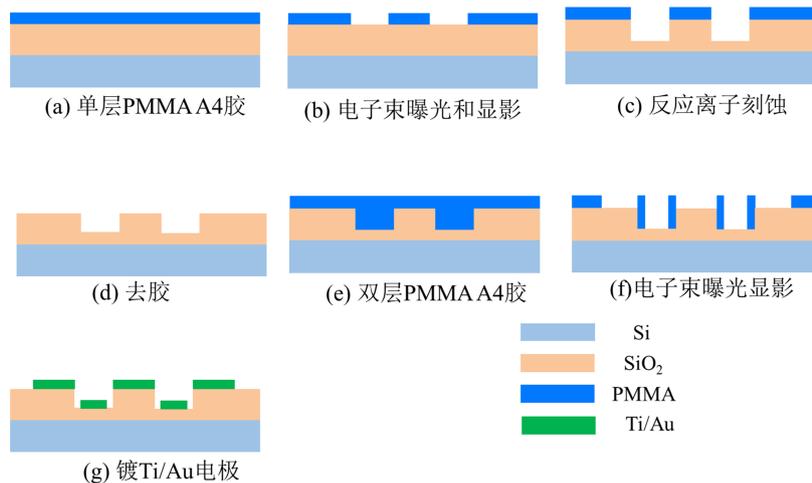


图 3 串联石墨烯纳米机械振子前两步工艺步骤示意图.

: IPA=1 : 3)) 显影 60s、异丙醇(IPA)定影 30 s, 显影后的样品剖面示意图如图 3(b)所示. 之后使用 Oxford NGP80 Pro 刻蚀设备进行 RIE, 把目标材料刻蚀掉.

第二步制备电极结构. 本文样品制备使用的是双层 950 K PMMA A4 胶(匀胶参数同上)匀胶后的样品结构示意图如图 3(e)所示. 之后使用电子束曝光, 制备石墨烯纳米机械振子电极结构, 显影定影后的样品如图 3(f)所示. 最后使用电子束蒸镀 Ti/Au(5/45 nm), 完成前两步后的样品剖面示意图如图 3(g)所示.

第三步干法转移条状石墨. 微米级定点转移技术可以用来制备多种二维材料堆叠的异质结<sup>[17]</sup>或

者把二维材料转移到特定位置上. 本文使用的定点转移技术为聚二甲基硅氧烷(PDMS)干法转移技术<sup>[17]</sup>. 如图 4 所示, 通过干法转移技术把条状石墨转移到制备好的凹槽结构上, 完成样品的制备. 具体来说, 首先使用机械剥离方式<sup>[18]</sup>, 在 PDMS 上撕取石墨, 找到合适尺寸、厚度的条状石墨, 再利用转移台将石墨转移至预先制备好的有落差电极结构的衬底上(如图 4 所示). 利用此种方式制备得到的条状石墨, 边界具有原子级的平整度<sup>[18]</sup>. 可以减少机械振子的耗散, 提高石墨烯纳米机械振子的品质因子(Q 值).

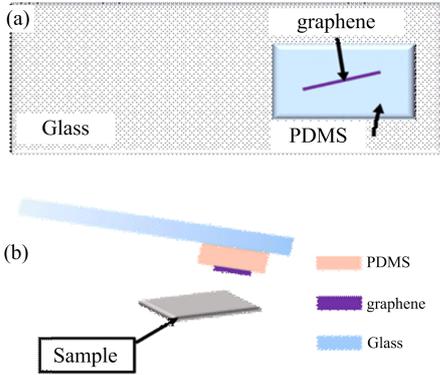


图 4 第三步工艺 PDMS 干法转移示意图<sup>[17]</sup>

### 3 纳米机械振子的 FM 测量

纳米机械振子的振动探测是这个领域的难题之一,本文用电学的方式驱动和探测石墨烯纳米机械

振子. 通过把机械振子的振动信号转换成电流信号, 读取机械振子振动情况. 源漏电极与栅极电极之间存在寄生电容, 与石墨之间存在接触电阻, 可以等效成 RC 低通滤波器( $\sim 100$  kHz). 如果直接在源漏电极上施加频率等于机械振子谐振的微波信号( $\sim 100$  MHz)来表征机械振子, 系统中频率高于低通滤波器截止频率( $\sim 100$  kHz)的信号, 包括机械振子谐振频率附近频段的电流信号( $\sim 100$  MHz)都会被低通滤波器( $\sim 100$  kHz)过滤掉, 导致测量不到机械振子的振动信号. 针对这个问题, 国际上其他小组使用各种混频技术, 如双源混频<sup>[20, 21]</sup>、调幅(AM)混频<sup>[21]</sup>和调频(FM)混频<sup>[22]</sup>技术来降低读出信号的频率, 测量机械振子的振动. 其中 FM 混频技术可以降低噪声, 提高信噪比, 从而更好地检测石墨烯的机械振动<sup>[22]</sup>. 故本文采用 FM 测量方式来读取石墨烯纳米机械振子的振动, 测量线路示意图如图 5 所示.

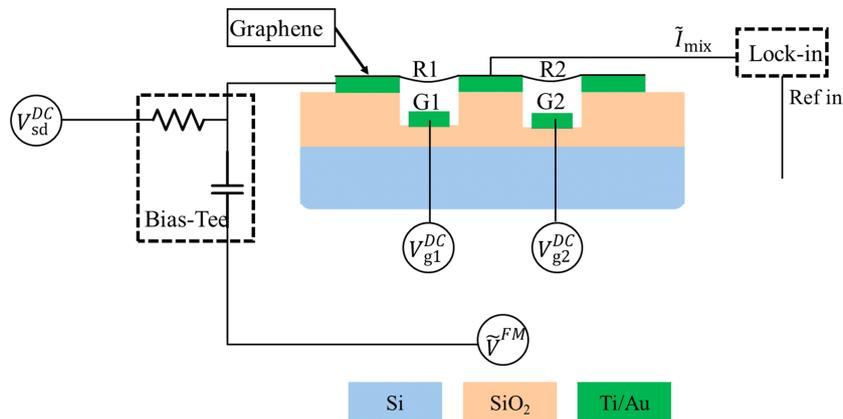


图 5 FM 测量线路示意图<sup>[22]</sup>

我们在源电极上加频率调制的驱动电压  $\tilde{V}^{FM}$  和偏置电压  $V_{sd}^{DC}$ . 其中驱动电压  $\tilde{V}^{FM}$  由微波源 ASG E8257D 提供; 偏置电压  $V_{sd}^{DC}$  由锁相放大器(Lock in Amplifier)的直流输出提供; 栅极 G1 和 G2 上加由 Keithley 2400 直流电压源提供的直流电压  $V_{g1}^{DC}$  和  $V_{g2}^{DC}$ . 在漏电极上利用锁相放大器测量混频电流  $\tilde{I}_{mix}$ , 读取机械振子的振动信息. 其中 Ref in 为频率为  $\omega_L$  的参考信号(Reference Signal), 由微波源提供.

### 4 纳米机械振子机械模式表征

我们采用上述的 FM 混频测量技术, 对单个石墨烯纳米机械振子进行表征. 在微波源功率 10 dBm

下(经过测量线路和衰减器的衰减后, 实际功率大约是一 20 dBm), 调节 R1 的栅极电压  $V_{g1}^{DC}$  (18 V $\sim$ 22 V)和驱动频率  $f$  (135 MHz $\sim$ 142 MHz), 测量机械振子混频电流随着栅极电压和驱动频率变化的响应, 如图 6(a)所示; 调节 R2 的栅极电压  $V_{g2}^{DC}$  ( $-20$  V $\sim$ 20 V)和驱动频率  $f$  (120 MHz $\sim$ 160 MHz), 测量机械振子混频电流随着栅极电压和驱动频率变化的响应, 如图 6(b)所示, 图中两条抛物线分别是机械振子 R2 的低阶和高阶振动模式. 与此同时, 由于 R1 的栅极电压不变( $V_{g1}^{DC} = 20$  V), R1 的谐振频率不变, 对应图 6(b)中的横线, 谐振频率在 138.5 MHz 附近, 与图 6(a)中显示的在  $V_{g1}^{DC} = 20$  V 时 R1 的谐振频率一致.

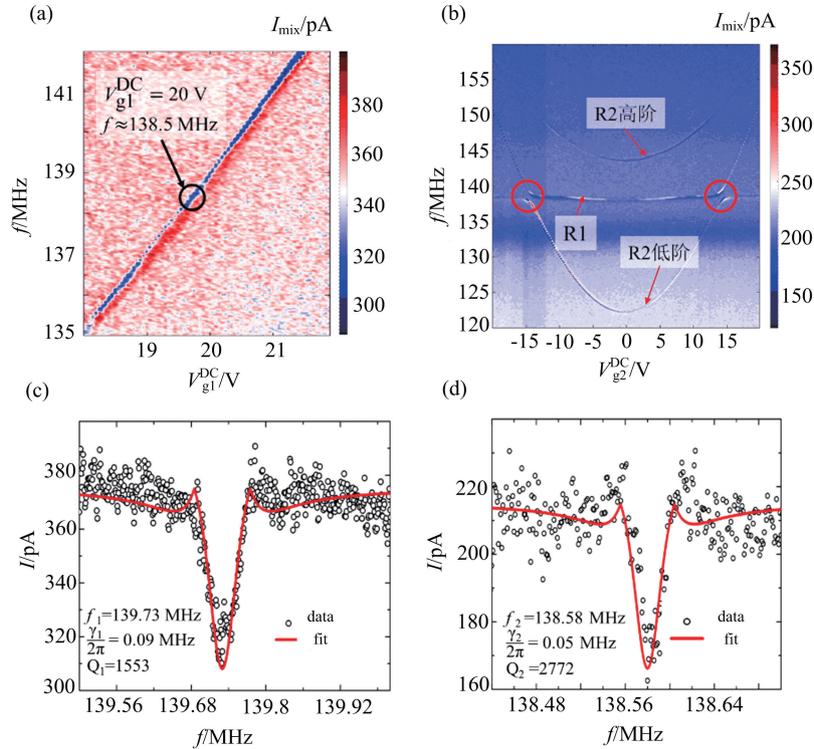


图 6 (a)图中斜线表明机械振子 R1 谐振频率随着栅极电压  $V_{g1}^{DC}$  的变化,黑色圆圈表示是当  $V_{g1}^{DC} = 20$  V 时, R1 的谐振频率在 138.5 MHz 附近. (b)图中两条类抛物线形的曲线表明机械振子 R2 谐振频率随着栅极电压  $V_{g2}^{DC}$  的变化,红色圆圈处的反交叉是 R1 和 R2(低阶振动模式)耦合导致的. (c)机械振子 R1 的谐振峰、耗散率和品质因数的提取. (d)机械振子 R2 的谐振峰、耗散率和品质因数的提取.

为了表征 R1, R2 的品质因子,我们在 R1 和 R2 的谐振峰附近进行细扫,测得了混频电流信号的散点图,并按照公式(1)对线型进行了拟合:

$$\tilde{I}_{mix} \propto \frac{2f \times \left( f^2 - f_0^2 - \frac{f_0^2}{Q} \right) \left( f^2 - f_0^2 + \frac{f_0^2}{Q} \right)}{\left[ \left( f^2 - f_0^2 \right)^2 + \left( \frac{f_0 f}{Q} \right)^2 \right]^2} \quad (1)$$

其中  $f$  是外加的驱动频率,  $f_0$  是机械振子的谐振频率,  $Q$  是品质因子<sup>[22]</sup>. 如图 6(c) 所示, 当  $V_{g1}^{DC} = 20$  V,  $V_{g2}^{DC} = 1$  V 时, R1 的谐振频率  $f_1 = \omega_1/2\pi = 139.73$  MHz, 耗散率  $\gamma_1/2\pi = 0.09$  MHz, 品质因子  $Q_1 = \omega_1/\gamma_1 = 1553$ ; 如图 6(d) 当  $V_{g1}^{DC} = 1$  V,  $V_{g2}^{DC} = 14.3$  V 时, R2 的谐振频率  $f_2 = \omega_2/2\pi = 138.58$  MHz, 耗散率  $\gamma_2/2\pi = 0.05$  MHz, 品质因子  $Q_2 = \omega_2/\gamma_2 = 2772$ .

### 5 耦合系统的协同系数

我们对 R1 和 R2(低阶振动模式) 出现反交叉

的区域进行了细致表征(图 6(b)中右边红色圆圈附近). 在微波源输出功率 10 dBm 下(如前所述, 实际功率大约是一 20 dBm), R1 的栅极电压  $V_{g1}^{DC} = 20$  V, 调节 R2 栅极电压  $V_{g2}^{DC}$  (10 V ~ 18 V) 和驱动频率  $f = \omega/2\pi$  (135 MHz ~ 142 MHz), 观察到 R1 和 R2 振子频谱出现反交叉的现象, 如图 7 所示. 从

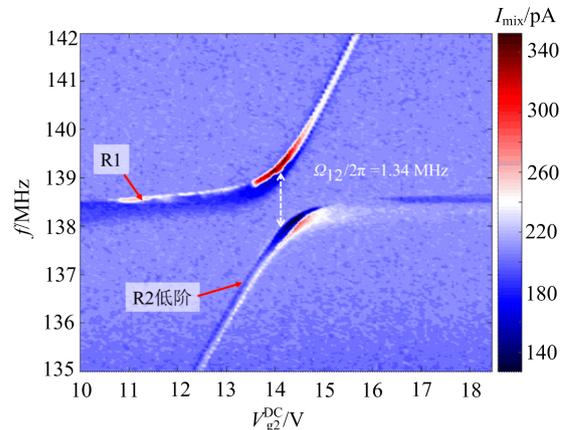


图 7 固定  $V_{g1}^{DC} = 20$  V, 调节 R2 栅极电压  $V_{g2}^{DC}$  (10 V ~ 18 V) 和驱动频率  $f = \omega/2\pi$  (135 MHz ~ 142 MHz), 观察到 R1 和 R2 的强耦合, 耦合强度为 1.34 MHz.

劈裂大小提取耦合强度  $\Omega_{12}/2\pi = 1.34$  MHz. 与机械振子 R1 和 R2 的耗散  $\gamma_1, \gamma_2$  相比, 机械振子 R1 和 R2 的耦合强度  $\Omega_{12} \gg \gamma_1, \gamma_2$ , 说明串联石墨烯机械振子能量交换速度要比它们各自能量耗散的速度快, 达到强耦合<sup>[23]</sup>.

可以定义协同系数  $C = \Omega_{12}^2/\gamma_1\gamma_2$ , 表征串联石墨烯纳米机械振子间声子能量交换的效率<sup>[24]</sup>. 根据  $C = \Omega_{12}^2/\gamma_1\gamma_2$  计算得到我们制备的串联石墨烯纳米机械振子系统的协同系数  $C = 399$ .

## 6 结 论

本文运用电子束曝光 (EBL)、反应离子刻蚀 (RIE) 和电子束蒸发镀膜等微纳加工工艺和 PDMS

干法转移技术制备了串联石墨烯纳米机械振子样品; 使用 FM 混频测量的方式, 读取纳米机械振子的振动信息, 并从谐振信号中提取出品质因子 ( $Q$ )<sub>1</sub> =  $\omega_1/\gamma_1 = 1553$ ,  $Q_2 = \omega_2/\gamma_2 = 2772$ ) 和耗散率 ( $\gamma_1/2\pi = 0.09$  MHz,  $\gamma_2/2\pi = 0.05$  MHz). 实验中观察到串联石墨烯纳米机械振子强耦合现象 ( $\Omega_{12} \gg \gamma_1, \gamma_2$ ), 耦合强度  $\Omega_{12}/2\pi = 1.34$  MHz, 测得了串联石墨烯机械振子的协同系数  $C = \Omega_{12}^2/\gamma_1\gamma_2 = 399$ . 本文中使用 FM 电学测量的方式测得石墨烯纳米机械振子的振动信息, 获得了高协同系数, 为进一步研究强耦合石墨烯纳米机械振子体系声子的相干操作提供了基础.

## 参 考 文 献

- [1] H. Okamoto, A. Gourgout, C.-Y. Chang, K. Onomitsu, I. Mahboob, E. Y. Chang, H. Yamaguchi, *Nat. Phys.*, **9** (2013), 480.
- [2] T. Faust, J. Rieger, M. J. Seitner, J. P. Kotthaus, E. M. Weig, *Nat. Phys.*, **9** (2013), 485.
- [3] M. Metcalfe, *Appl. Phys. Lett.*, **1** (2014), 031105.
- [4] D. Zhu, X.-H. Wang, W.-C. Kong, G.-W. Deng, J.-T. Wang, H.-O. Li, G. Cao, M. Xiao, K.-L. Jiang, X.-C. Dai, G.-C. Guo, F. Nori, G.-P. Guo, *Nano Lett.*, **17** (2017), 915.
- [5] G.-W. Deng, D. Zhu, X.-H. Wang, C.-L. Zou, J.-T. Wang, H.-O. Li, G. Cao, D. Liu, Y. Li, M. Xiao, G.-C. Guo, K.-L. Jiang, X.-C. Dai, G.-P. Guo, *Nano Lett.*, **16** (2016), 5456.
- [6] V. Singh, S. Sengupta, H. S. Solanki, R. Dhall, A. Allain, S. Dhara, P. Pant, M. M. Deshmukh, *Nanotechnology*, **21** (2010), 165204.
- [7] J. I. Cirac, P. Zoller, H. J. Kimble, H. Mabuchi, *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997), 3221.
- [8] S.-X. Li, D. Zhu, X.-H. Wang, J.-T. Wang, G.-W. Deng, H.-O. Li, G. Cao, M. Xiao, G.-C. Guo, K.-L. Jiang, X.-C. Dai, G.-P. Guo, *Nanoscale*, **8** (2016), 14809.
- [9] C.-H. Liu, I. S. Kim, L. J. Lauhon, *Nano Lett.*, **15** (2015), 6727.
- [10] C. Changyao, S. Rosenblatt, K. I. Bolotin, P. Kim, I. Kymissis, H. L. Stormer, T. F. Heinz, J. Hone 2009 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 7-9 Dec. 2009 p1-4.
- [11] G. Luo, Z.-Z. Zhang, G.-W. Deng, H.-O. Li, G. Cao, M. Xiao, G.-C. Guo, L. Tian, G.-P. Guo, *Nature Communications*, **9** (2018), 383.
- [12] C. Chen, S. Rosenblatt, K. I. Bolotin, W. Kalb, P. Kim, I. Kymissis, H. L. Stormer, T. F. Heinz, J. Hone, *Nat. Nanotechnol.*, **4** (2009), 861.
- [13] N. Tombros, A. Veligura, J. Junesch, J. J. V. D. Berg, P. J. Zomer, M. Wojtaszek, I. J. V. Marun, H. T. Jonkman, B. J. V. Wees, *J. Appl. Phys.*, **109** (2011), 093702.
- [14] F. Guan, P. Kumaravadivel, D. V. Averin, X. Du, *Appl. Phys. Lett.*, **107** (2015), 193102.
- [15] C. Chen, S. Lee, V. V. Deshpande, G.-H. Lee, M. Lekas, K. Shepard, J. Hone, *Nat. Nanotechnol.*, **8** (2013), 923.
- [16] P. Weber, J. Güttinger, I. Tsioutsios, D. E. Chang, A. Bachtold, *Nano Lett.*, **14** (2014), 2854.
- [17] A. Castellanos-Gomez, M. Buscema, R. Molenaar, V. Singh, L. Janssen, H. S. J. Van Der Zant, G. A. Steele, *2D Materials*, **1** (2014), 011002.
- [18] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science*, **306** (2004), 666.
- [19] C. Chen, J. Hone, *Proc. IEEE*, **101** (2013), 1766.
- [20] C. Chen 2013 *Ph. D. Dissertation* (New York Columbia University).
- [21] I. Tsioutsios, J. Pascual I Gainza 2016 *Ph. D. Dissertation* (New York Cornell University).
- [22] V. Gouttenoire, T. Barois, S. Perisanu, J.-L. Leclercq, S. T. Purcell, P. Vincent, A. J. S. Ayari, *Small*, **69** (2010), 1060.
- [23] J. D. Teufel, D. Li, M. S. Allman, K. Cicak, A. J. Sirois, J. D. Whittaker, R. W. Simmonds, *Nature*, **471** (2011), 204.
- [24] M. Yuan, V. Singh, Y. M. Blanter, G. A. Steele, *Nat. Commun.*, **6** (2015), 8491.