

# 品质因子可调的石墨烯纳米机械振子

苏子佳

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: 2020-05-26; 接收日期: 2020-06-04

**【摘要】** 纳米机械振子尺寸小, 质量轻, 可以用来制作探测力、质量等微小物理量的超灵敏探测器. 石墨烯拥有质量轻、密度低和杨氏模量高等特性, 被认为是制作纳米机械振子的理想材料. 石墨烯纳米机械振子因其具有的谐振频率高、品质因子高和共振频率可调性高等优势, 近年来得到了人们的广泛关注. 作为表征纳米机械振子性能的一个重要指标, 品质因子越高, 意味着纳米机械振子耗散越低, 纳米机械振子的灵敏度越高. 本文通过微纳加工的工艺制备出一种谐振频率随栅压可调(调节的范围为 73 MHz~90 MHz)的石墨烯纳米机械振子样品, 研究其在极低温高真空环境下的品质因子与栅极电压之间的关系. 实验表明通过栅压调节振子的内部应力, 能够使石墨烯纳米机械振子品质因子从 220 提高到 1000. 我们的结果为二维材料纳米机械振子的耗散研究提供了一种新的研究思路.

**关键词:** 石墨烯, 纳米机械振子, 耗散, 品质因子

**PACS:** 7460, 7490, 0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.04.003

## Graphene Nanomechanical Resonator with Tunable Quality Factor

SU Zijia

*CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China*

Received date: 2020-05-26; accepted date: 2020-06-04

**【Abstract】** Nanomechanical resonators are small in size and light in weight, and can be used for ultra-sensitive force and mass detection. Graphene has the characteristics of light weight, low density and high Young's modulus, and is considered to be an ideal material for fabricating nanomechanical resonators. Graphene nanomechanical resonators have received extensive attentions in recent years because of their advantages such as high resonant frequency, high quality factor and high tunability of the resonant frequency. As an important parameter to characterize the performance of nanomechanical resonators, the higher the quality factor, the lower the dissipation, leading to a higher sensitivity of the nanomechanical resonators. Here, we fabricate a doubly-clamped graphene nanomechanical resonator with a resonance frequency that can be tuned by the gate voltage (from 73 MHz to 90 MHz). The relationship between its quality factor and the gate voltage under low temperature and high vacuum environment is studied. The experimental result shows that applying external stress to the resonator by gate voltage can increase the quality factor from 220 to 1000. Our results shed light on the study of the dissipation of the two-dimensional material based nanomechanical resonators.

**Keywords:** Graphene, Nanomechanical resonator, Damping, Quality factor

**PACS:** 7460,7490,0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2020.04.003

**Reference method:** SU Zijia, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0192 (2020)

## 1 引言

在纳米机电系统(Nano-Electro-Mechanical System, NEMS)中,纳米机械振子(nanomechanical resonator)以其独特的物理特性和广泛的应用前景而备受关注.表征纳米机械振子的基本参数有谐振频率  $f_0$  和品质因子  $Q$ ,一个好的纳米机械振子器件应该同时具有高谐振频率和高  $Q$  值的特性.石墨烯是一种二维碳纳米材料,其中碳原子按六方晶格结构排布.它拥有质量轻、密度低和杨氏模量高等特性<sup>[1]</sup>,被认为是制作纳米机械振子的理想材料.石墨烯纳米机械振子的谐振频率非常高,之前报道的频率已经达到了 GHz 量级<sup>[2-4]</sup>.除此之外,它还有着较高的品质因子<sup>[5]</sup>,并且其谐振频率能通过电学的方式来调控<sup>[6]</sup>.它已经在超灵敏检测<sup>[7-12]</sup>、腔光力学<sup>[13-17]</sup>、非线性耗散<sup>[18-22]</sup>、参数放大<sup>[23]</sup>、非近邻模式耦合<sup>[24]</sup>等方面展现出了广泛的应用前景.

作为表征纳米机械振子的一个重要的物理量,品质因子的倒数  $Q^{-1}$  反映了系统耗散的大小,  $Q^{-1}$  表示振子系统与环境相互作用在每个振动周期所损失的能量与总能量的比值.实际上,随着纳米机械振子尺寸的减小,系统的表面积-体积比增加,从而导致纳米机械振子耗散增加<sup>[25]</sup>.如何降低纳米机械振子的耗散,一直是人们比较关心的问题.耗散的来源比较复杂,一般来说,纳米机械振子的耗散主要有这些机制:表面耗散<sup>[26-29]</sup>,夹紧/支撑耗散<sup>[30-32]</sup>、气体阻尼耗散<sup>[33]</sup>、热弹性阻尼耗散<sup>[34-36]</sup>和二能级耗散<sup>[37,38]</sup>.根据之前的文献报道,低温真空下的石墨烯纳米机械振子应主要考虑欧姆耗散<sup>[39]</sup>.为了探究石墨烯纳米机械振子的耗散,我们制备了一种双端固定的石墨烯纳米机械振子,表征了低驱动功率下,

纳米机械振子的品质因子  $Q$ ,通过调节栅极电压,观察  $Q$  值的变化,研究  $Q$  值随着栅压的变化关系.我们发现随着栅压的增加,石墨烯纳米机械振子的  $Q$  值单调增加,这一结果与之前报道的欧姆耗散的机制不同,说明通过调节栅压增加的应力可能有助于降低石墨烯纳米机械振子的耗散,我们的结果为石墨烯纳米机械振子在低温下耗散的研究提供了实验依据.

## 2 石墨烯纳米机械振子的制备

我们设计的石墨烯纳米机械振子扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片如图 1 所示.其中中间的凹槽是刻蚀而成的,凹槽的深度大约为 170 nm,再往凹槽内和凹槽上面两边蒸镀金属(Ti/Au=3 nm/20 nm)形成三个电极,其中凹槽里的电极称为栅极,用“G”来表示,在凹槽上面的电极为源极和漏极,分别用“S”和“D”示来表示,条形石墨横跨源极和漏极,悬浮在栅极上,悬浮的高度大约为 170 nm.

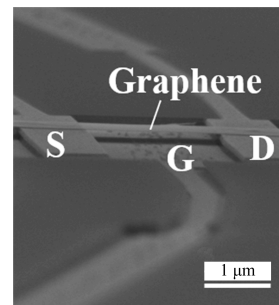


图 1 石墨烯纳米机械振子的扫描电子显微镜图

在石墨烯纳米机械振子的样品加工中,主要用到的工艺有电子束曝光工艺,刻蚀工艺,薄膜沉积工艺和石墨烯转移工艺.工艺步骤示意图如图 2 所示,具体工艺如下:

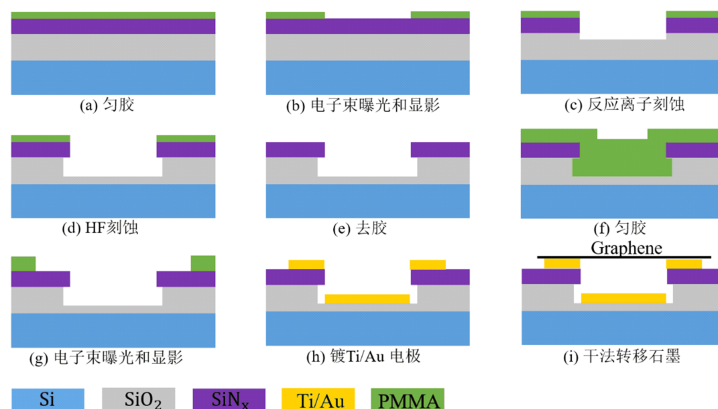


图 2 石墨烯纳米机械振子样品加工步骤示意图(步骤顺序为 a-i)

加工中使用的衬底为三层材料,从顶部至底部依次是 50 nm 的低压化学气相沉积(Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD)生长的  $\text{SiN}_x$ , 500 nm 热氧化法生长的  $\text{SiO}_2$ , 和约 700  $\mu\text{m}$  厚的高阻硅. 第一步首先使用电子束曝光制备刻蚀结构. 在衬底上匀胶之后(如图 2(a)所示),经过电子束曝光,显影定影之后得到需要被刻蚀的图案(如图 2(b)所示). 接着进行刻蚀,这里的刻蚀分为两部分,首先是反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE),如图 2(c)所示,主要刻蚀的材料是  $\text{SiN}_x$  和  $\text{SiO}_2$ ,刻蚀的结果是把只有 50 nm 厚的  $\text{SiN}_x$  层先刻穿紧接着刻蚀几十 nm 厚的  $\text{SiO}_2$ ;第二部分刻蚀为 HF 湿法刻蚀,主要是为了刻蚀  $\text{SiO}_2$ ,此时的刻蚀是各向同性的,所以能往侧壁方向刻蚀,刻蚀后的这种  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$  结构也称之为 undercut 结构,其剖面示意图如图 2(d)所示. 刻蚀之后去除前一步所剩的残胶(如图 2(e)所示). 接着,进行第二次电子束曝光并制备电极结构. 同样是匀胶(如图 2(f)所示)之后经过电子束曝光,显影后得到电极的图案(如图 2(g)所示). 接着放置在电子束蒸发镀膜机中蒸镀金属,蒸镀的材料和厚度分别为  $\text{Ti}/\text{Au} = 3 \text{ nm}/20 \text{ nm}$ (钛金厚度越薄,电极与衬底表面高度差越小,石墨烯转移的成功率越大),在镀膜的过程中,  $\text{Ti}/\text{Au}$  会在 undercut 的地方自动断开,从而分离出源极/漏极/栅极,如图 2(h)所示. 最后转移条形

石墨. 我们采用的是干法转移工艺<sup>[40]</sup>,如图 2(i)所示,首先通过机械剥离<sup>[41]</sup>的办法,在 PDMS 上撕取石墨,找到合适尺寸厚度的石墨后,利用转移平台把石墨定点转移到制备好电极结构的衬底上,最终完成样品的制备过程.

### 3 石墨烯纳米机械振子的测量与表征

我们把制备好的样品放置在极低温高真空的环境下测量,主要是为了减少空气等外界环境对机械振子产生的耗散,测试温度为 300 mK,环境压强为  $10^{-7} \text{ Torr}$ . 为了得到更好的信噪比,我们采用的是频率调制(Frequency Modulation, FM)混频测量技术<sup>[42]</sup>的电学读出手段. 具体测量示意图如图 3(a)所示,利用微波源 ASG E8257D 在源极上施加频率被调制后的 FM 驱动信号  $\tilde{V}_f^{FM}$ , FM 信号有如下表达式:

$$\tilde{V}_f^{FM}(t) = V_c \cos(2\pi f_c t + \frac{f_\Delta}{f_L} \sin(2\pi f_L t)) \quad (1)$$

其中  $V_c$  为振幅,  $f_c$  为驱动频率,  $f_\Delta$  为频率偏差,  $f_L$  为调制频率. 在实验中我们取  $f_\Delta = 33 \text{ kHz}$ ,  $f_L = 0.616 \text{ kHz}$ . 往栅极上施加直流电压  $V_g$ , 由 Keithley 2400 直流电压源来提供. 漏极上输出的混频电流  $I_{\text{mix}}$  接入锁相放大器 SR 830 进行测量,读取振子的振动信息.

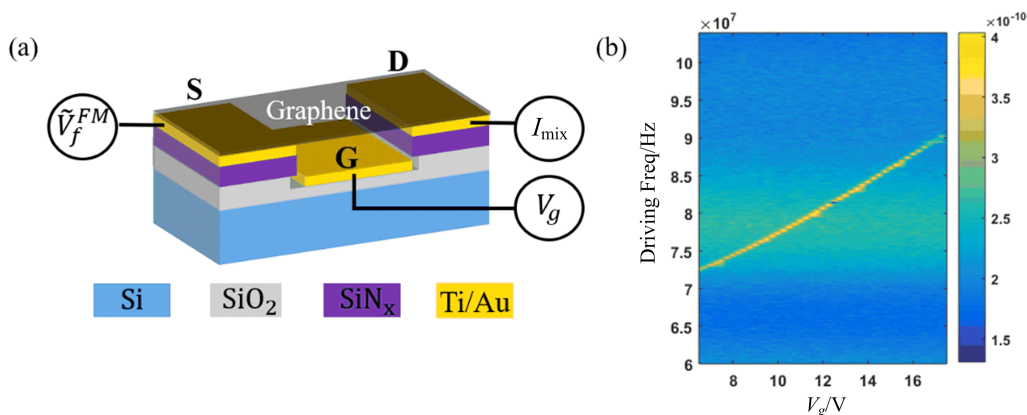


图 3 (a)石墨烯纳米机械振子测量示意图 (b)混频电流随栅极电压和驱动频率的响应, 图中黄色亮线即为振子谐振频率随栅压的变化关系

通过 FM 混频测量技术,我们能够测得石墨烯纳米机械振子的谐振峰,从而提取出振子的谐振频率  $f_0$ . 给栅极施加直流电压,相当于利用静电力给振子施加了一个应力<sup>[1]</sup>,直流栅压越大,应力越大.

通过调节栅压,能够看到振子的谐振频率随着栅压变化的关系,如图 3(b)所示. 可以看到,随着栅压的增大,振子内部的应力也增大,谐振频率升高. 在栅极电压为 6~18 V 的范围中,谐振频率能够调节的

范围为(73 MHz~90 MHz),这说明石墨烯纳米机械振子有很强的频率可调性。

#### 4 石墨烯纳米机械振子品质因子的提取

为了提取样品的品质因子,需要在振子的谐振频率附近进行更精细的测量,得到混频电流信号随着扫描驱动信号频率的变化关系.石墨烯纳米机械振子有着很强的非线性耗散效应,表现为振幅越大,系统的耗散越大<sup>[43]</sup>.为了降低非线性耗散的影响,我们需要尽可能降低驱动功率.如图4所示,我们把栅压定在  $V_g = 15\text{ V}$  处,驱动功率为  $-65\text{ dBm}$  时,在  $85.6\text{ MHz}\sim 86.4\text{ MHz}$  范围内测量得到了混频电流与扫描驱动信号频率的依赖关系.我们利用公式(2)对实验结果进行拟合<sup>[42]</sup>:

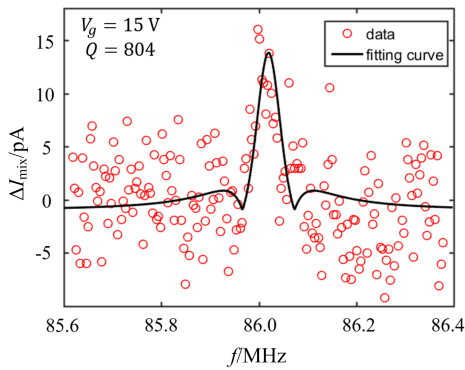


图4 混频电流随扫描频率的变化关系

$$I_{mix} \propto \left| \frac{2f_c(f_c^2 - f_0^2 - \frac{f_0^2}{Q})(f_c^2 - f_0^2 + \frac{f_0^2}{Q})}{[(f_c^2 - f_0^2)^2 + (\frac{f_0 f_c}{Q})^2]^2} \right| \quad (2)$$

其中  $f_c$  为 FM 驱动信号的频率,  $f_0$  为振子的谐振频率,  $Q$  为振子的品质因子.当  $V_g = 15\text{ V}$  时,  $f_0 = 86.02\text{ MHz}$ ,  $Q = 804$ .拟合的曲线如图4中的黑色曲线所示.

#### 5 Q值和耗散随着栅压的变化关系

我们按照上述的方法在不同栅压下进行测量和拟合,提取出不同栅压下的  $Q$  值,即可得到品质因子随栅压的变化关系.如图5(a)所示,随着栅极电压的增加,石墨烯纳米机械振子的品质因子单调上升,从220提升至1000.同时,我们还提取了耗散系

数  $\gamma = 2\pi m f_0 Q^{-1}$  随栅压的变化关系,如图5(b)所示,可以看出耗散系数随着栅压的增加而降低.这一结果与Chen等人<sup>[44]</sup>和Singh等人<sup>[45]</sup>的结果不同.他们认为在石墨烯纳米机械振子中,欧姆耗散起主导作用,增加栅极电压增加了欧姆耗散的贡献,从而降低了  $Q$  值.我们认为一个可能的原因是,在我们的样品中,栅压增加了石墨烯纳米机械振子的应力,从而降低了耗散,提高了品质因子,这与Verbridge等人在氮化硅悬梁<sup>[46]</sup>上看到的结果类似.需要指出的是,我们的石墨烯样品在低温下的品质因子远没有Chen等人的那么高,说明体系中可能存在其他的耗散途径,如非线性耗散<sup>[43]</sup>,这些耗散途径的影响仍需进一步探究.

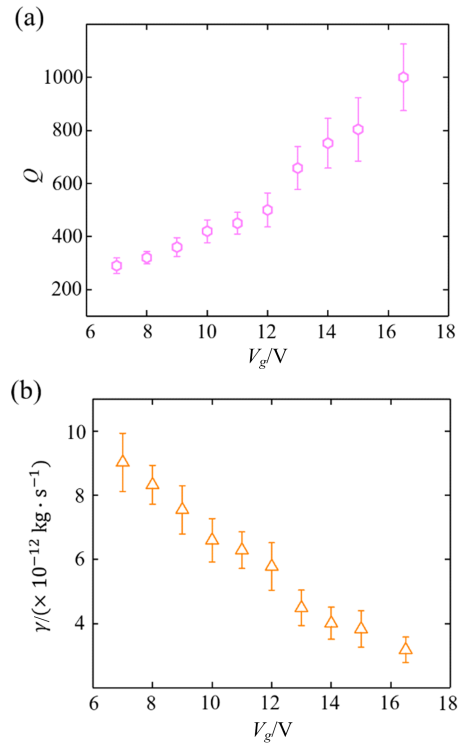


图5 (a)石墨烯纳米机械振子的品质因子随栅压的变化关系 (b)石墨烯纳米机械振子的线性耗散系数随着栅压的变化关系

#### 6 结 论

本文通过微纳加工的工艺制备出石墨烯纳米机械振子样品,在极低温高真空中使用了FM混频测量技术读取了振子的振动信息,提取了振子在不同栅压下的品质因子和线性耗散系数.实验结果表明,随着栅压的增大,品质因子提高,线性耗散系数降低.我们可以实现栅极电压对石墨烯纳米机械振子

品质因数从 220 到 1000 的调节. 我们认为这是由于石墨烯纳米机械振子中应力的增加, 降低了体系的

耗散, 提高了品质因子. 我们的结果为二维材料的纳米机械振子的耗散研究提供了一种新的研究思路.

### 参 考 文 献

- [1] C. Y. Chen 2013 Graphene nanoelectromechanical resonators and oscillators. *Ph. D. Dissertation* (New York : Columbia University)
- [2] X. M. H. Huang, X. L. Feng, C. A. Zorman, M. Mehregany, M. L. Roukes 2005 *New J. Phys.* **7** 247
- [3] A. Husain, J. Hone, H. W. C. Postma, X. M. H. Huang, T. Drake, M. Barbic, A. Scherer, M. L. Roukes 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** (6) 1240-1242
- [4] H. B. Peng, C. W. Chang, S. Aloni, T. D. Yuzvinsky, A. Zettl 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** (8) 087203
- [5] J. Guttinger, A. Noury, P. Weber, A. M. Eriksson, C. Lagoin, J. Moser, C. Eichler, A. Wallraff, A. Isacsson, A. Bachtold 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** (7) 631-636
- [6] C. Y. Chen, S. Lee, V. V. Deshpande, G. H. Lee, M. Leikas, K. Shepard, J. Hone 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** (12) 923-927
- [7] C. Y. Chen, S. Rosenblatt, K. I. Bolotin, W. Kalb, P. Kim, I. Kymissis, H. L. Stormer, T. F. Heinz, J. Hone 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** (12) 861-867
- [8] D. Davidovikj, M. Poot, S. J. Cartamil-Bueno, H. S. J. van der Zant, P. G. Steeneken 2018 *Nano Lett.* **18** (5) 2852-2858
- [9] G. J. Verbiest, J. N. Kirchhof, J. Sonntag, M. Goldsche, T. Khodkov, C. Stampfer 2018 *Nano Lett.* **18** (8) 5132-5137
- [10] R. J. Dolleman, D. Davidovikj, S. J. Cartamil-Bueno, H. S. J. van der Zant, P. G. Steeneken 2016 *Nano Lett.* **16** (1) 568-571
- [11] M. K. H. Bhaskaran 2015 *Nano Lett.* **15** (4) 2562-2567
- [12] X. G. Fan, F. Forsberg, A. D. Smith, S. Schroder, S. Wagner, H. Rodjegard, A. C. Fischer, M. Ostling, M. C. Lemme, F. Niklaus 2019 *Nat. Electron.* **2** (9) 394-404
- [13] V. Singh, S. J. Bosman, B. H. Schneider, Y. M. Blanter, A. Castellanos-Gomez, G. A. Steele 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** (10) 820-824
- [14] X. Song, M. Oksanen, J. Li, P. J. Hakonen, M. A. Sillanpaa 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** (2) 027404
- [15] P. Weber, J. Guttinger, I. Tsioutsios, D. E. Chang, A. Bachtold 2014 *Nano Lett.* **14** (5) 2854-2860
- [16] P. Weber, J. Guttinger, A. Noury, J. Vergara-Cruz, A. Bachtold 2016 *Nat. Commun.* **7** 12496
- [17] R. De Alba, F. Massel, I. R. Storch, T. S. Abhilash, A. Hui, P. L. McEuen, H. G. Craighead, J. M. Parpia 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** (9) 741-746
- [18] T. F. Miao, S. Yeom, P. Wang, B. Standley, M. Bockrath 2014 *Nano Lett.* **14** (6) 2982-2987
- [19] R. J. Dolleman, P. Belardinelli, S. Hourii, H. S. J. van der Zant, F. Alijani, P. G. Steeneken 2019 *Nano Lett.* **19** (2) 1282-1288
- [20] D. Davidovikj, F. Alijani, S. J. Cartamil-Bueno, H. S. J. van der Zant, M. Amabili, P. G. Steeneken 2017 *Nat. Commun.* **8** 1253
- [21] A. Eichler, J. Moser, J. Chaste, M. Zdrojek, I. Wilson-Rae, A. Bachtold 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** (6) 339-342
- [22] V. Singh, O. Shevchuk, Y. M. Blanter, G. A. Steele 2016 *Phys. Rev. B* **93** (24) 245407
- [23] J. P. Mathew, R. N. Patel, A. Borah, R. Vijay, M. M. Deshmukh 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** (9) 747-751
- [24] G. Luo, Z. Z. Zhang, G. W. Deng, H. O. Li, G. Cao, M. Xiao, G. C. Guo, L. Tian, G. P. Guo 2018 *Nat. Commun.* **9** 383
- [25] M. Imboden, P. Mohanty 2014 *Phys. Rep.* **534** (3) 89-146
- [26] K. Y. Yasumura, T. D. Stowe, E. M. Chow, T. Pfafman, T. W. Kenny, B. C. Stipe, D. Rugar 2000 *J. Microelectromech. Syst.* **9** 117-125
- [27] S. Evoy, A. Olkhovets, L. Sekaric, J. M. Parpia, H. G. Craighead, D. W. Carr 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** (15) 2397-2399
- [28] A. N. Cleland, M. L. Roukes 2002 *J. Appl. Phys.* **92** (5) 2758-2769
- [29] J. L. Yang, T. Ono, M. Esashi 2001 *J. Vac. Sci. Technol. B* **19** (2) 551-556
- [30] J. A. Judge, D. M. Photiadis, J. F. Vignola, B. H. Houston, J. Jarzynski 2007 *J. Appl. Phys.* **101** (1) 013521
- [31] I. Wilson-Rae 2008 *Phys. Rev. B* **77** (24) 245418
- [32] M. C. Cross, R. Lifshitz 2001 *Phys. Rev. B* **64** (8) 085324
- [33] J. E. Sader 1998 *J. Appl. Phys.* **84** (1) 64-76
- [34] B. H. Houston, D. M. Photiadis, M. H. Marcus, J. A. Bucaro, X. Liu, J. F. Vignola 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** (7) 1300-1302
- [35] R. Lifshitz, M. L. Roukes 2000 *Phys. Rev. B* **61** (8) 5600-5609
- [36] S. K. De, N. R. Aluru 2006 *Phys. Rev. B* **74** (14) 144305
- [37] S. Sahling, M. Kolac, V. L. Katkov, V. A. Osipov 2014 *J. Low Temp. Phys.* **176** (1-2) 64-81
- [38] A. O. Caldeira, A. J. Leggett 1983 *Ann. Phys.* **149** (2)

374-456

- [39] C. Seoanez, F. Guinea, A. H. Castro 2007 *Phys. Rev. B* **76** (12) 125427
- [40] A. Castellanos-Gomez, M. Buscema, R. Molenaar, V. Singh, L. Janssen, H. S. J. van der Zant, G. A. Steele 2014 *2D Mater.* **1** (1) 011002
- [41] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov 2004 *Science* **306** (5696) 666-669
- [42] V. Gouttenoire, T. Barois, S. Perisanu, J. L. Leclercq, S. T. Purcell, P. Vincent, A. Ayari 2010 *Small* **6** (9) 1060-1065
- [43] A. Eichler, J. Moser, J. Chaste, M. Zdrojek, I. Wilson-Rae, A. Bachtold 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** (6) 339-342
- [44] C. Y. Chen, S. Rosenblatt, K. I. Bolotin, W. Kalb, P. Kim, I. Kymissis, H. L. Stormer, T. F. Heinz, J. Hone 2009 *Nat. Nanotechnol.* **4** (12) 861-867
- [45] V. Singh, S. Sengupta, H. S. Solanki, R. Dhall, A. Allain, S. Dhara, P. Pant, M. M. Deshmukh 2010 *Nanotechnology* **21** (16) 165204
- [46] S. S. Verbridge, D. F. Shapiro, H. G. Craighead, J. M. Parpia 2007 *Nano Lett.* **7** (6) 1728-1735