

基于单层二硫化钼纳米机械振子的全光学质量传感

陈华俊, 李 洋, 陈昌兆, 方贤文, 唐旭东

安徽理工大学力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001

摘要 提出了一种基于硅/二氧化硅基底的平板状圆形单层二硫化钼纳米机械振子系统。通过将一束较强的抽运激光和一束较弱的探测激光同时作用于该振子系统, 实现了一种测量机械振子频率的全光学方法, 证明了系统中存在声子诱导透明现象, 并给出其物理解释。通过测量探测吸收谱中两尖峰之间的分裂宽度, 发现激子和振子的耦合强度与线宽呈正比关系, 该方法可用来测量激子和振子的耦合强度。基于该纳米机械振子系统, 提出了一种全光学质量传感方案。通过测量光谱中的共振频移, 可直接得到沉积在二硫化钼振子表面的额外质量。数值结果显示, 该振子系统的质量响应率为 2.32 Hz/ag。单层二硫化钼纳米机械振子系统将在量子传感和基于二硫化钼的全光学器件中得到广泛应用。

关键词 光学器件; 量子光学; 二硫化钼; 纳米机械振子系统; 光学特性; 质量传感

中图分类号 O431.2; O472+.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0123001

All-Optical Mass Sensing Based on Monolayer Molybdenum Disulfide Nanomechanical Oscillator

Chen Huajun, Li Yang, Chen Changzhao, Fang Xianwen, Tang Xudong

*School of Mechanics and Photoelectric Physics, Anhui University of Science and Technology,
Huainan, Anhui 232001, China*

Abstract A plate-like circular monolayer molybdenum disulfide (MoS_2) nanomechanical oscillator system based on Si/SiO₂ substrate is proposed. An all-optical method, which uses a strong pump laser and a weak detection laser effect on the oscillator system at the same time, is proposed to measure mechanical oscillator frequency. The phenomenon of phonon-induced transparency is demonstrated in the system, and the physical interpretation is presented. By measuring the width between two peaks in the probe absorption spectrum, we find that the exciton-oscillator coupling strength is proportional to the width and the method can be used to measure the exciton-oscillator coupling strength. Further, an all-optical mass sensing scheme is proposed based on the nanomechanical oscillator system. By measuring the resonance frequency shift in optical spectrum, we can obtain the additional mass deposited on the surface of molybdenum disulfide oscillator directly. The simulation results show that the mass responsivity of the oscillator system is 2.32 Hz/ag. The monolayer molybdenum disulfide nanomechanical oscillator system may have potential applications in quantum sensing and all-optical MoS_2 -based devices.

Key words optical devices; quantum optics; molybdenum disulfide; nanomechanical oscillator system; optical properties; mass sensing

OCIS codes 230.1150; 270.1670; 220.4880

1 引 言

近年来, 石墨烯作为典型的二维结构纳米材料, 因其具有高刚度、低密度以及小尺寸等独特的性质受到研究者们广泛的关注^[1-2]。石墨烯还具有卓越的机械特性, 在纳米电子学^[3-4]和质量传感器件^[5-6]方面有着潜

收稿日期: 2016-06-27; **收到修改稿日期:** 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(11404005, 51502005, 61272153, 61572035)、安徽高校 2013 振兴计划青年人才项目(2013SQRL026ZD)、安徽省教育厅重点项目(KJ2012A085)

作者简介: 陈华俊(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事二硫化钼纳米机械振子系统的光学特性及其应用方面的研究。

E-mail: chenphysics@126.com

* **通信联系人.** E-mail: chenphysics@126.com

在应用。但是,本征石墨烯为无带隙纳米材料,实际应用中需要用到有直接带隙的材料时,石墨烯的应用将会受到限制,因此寻找其他具有天然带隙的半导体材料是很有必要的。目前,具有较大本征带隙的单层二硫化钼(MoO_2)材料成为研究热点^[7-10]。

二硫化钼是一种半导体材料,它的电子结构与厚度有关^[11-12]。随着层数的减少,二硫化钼材料由间接半导体(多层时禁带宽度为 1.2 eV)转变为直接半导体(单层时禁带宽度为 1.8 eV)^[12],因此单层二硫化钼可代替石墨烯应用于光电探测^[13-14]、场效应管^[15-18]和太阳能光电板^[19]等领域。此外,二硫化钼还具有超低质量^[20]、异常压力限制^[11]和高弹性模量^[21-22]等特性。实验中已经可以实现了基于多层二硫化钼的纳米机械振子系统^[20]和基于单层二硫化钼的纳米机械振子系统^[23],且它们在化学传感方面的应用也在实验中得到了证实^[24-25]。单层二硫化钼具有很大的表面体积比,该特性有利于其在传感方面的应用。

本文提出了一种基于硅/二氧化硅(Si/SiO_2)衬底^[20,23]的平板状圆形单层二硫化钼纳米机械振子系统。利用光学抽运-探测技术研究了该系统的相干光学特性,提出了一种测量振子与激子耦合强度的方法。研究了由二硫化钼振子与激子耦合引起的探测场的吸收和耗散现象,证明了激子和振子耦合引起的声子诱导透明现象。通过数值模拟,发现探测吸收谱中两尖峰的分裂宽度与激子和振子的耦合强度呈线性关系,从而为该耦合强度的确定提供了一种直观的制作方法。基于该系统,进一步提出了一种全光学质量传感方法。通过测量光学谱线中的共振频移,可直接得到沉积在二硫化钼振子表面的额外质量,计算得到该单层二硫化钼机械振子的质量响应率 $R = 2.32 \text{ Hz/ag}$ 。

2 基本原理

图 1(a)为基于单层二硫化钼的平板状圆形纳米机械振子系统的理论模型,将二硫化钼裁剪为圆形薄膜,覆盖到 Si/SiO_2 基底上构成纳米机械振子系统。 Si/SiO_2 基底的中间部分是中空的,中空的内圆形直径近似等于二硫化钼薄膜的直径; Si/SiO_2 基底支撑圆形二硫化钼薄膜,二硫化钼薄膜的上下表面可自由振动。将一束较强的抽运光(频率为 ω_c)和一束较弱的探测光(频率为 ω_s)作用到该系统上,研究该系统的光学特性。图 1(b)为单层二硫化钼的结构示意图,由共价键连接而成的钼原子平面夹于两个硫原子平面中间。图 1(c)为该系统中激子与振子之间的耦合作用能级图。

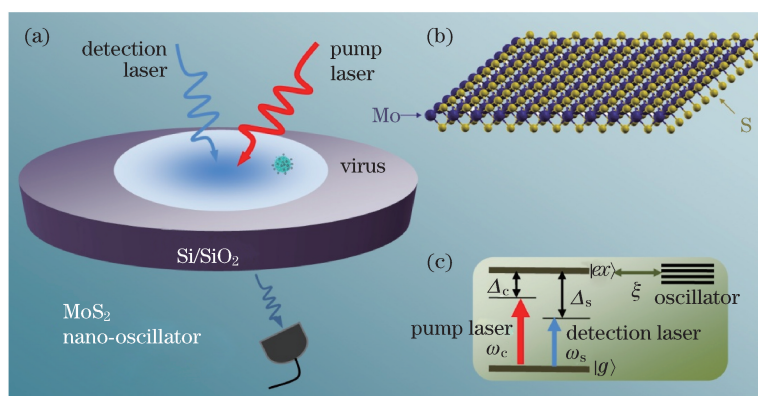


图 1 (a)基于单层二硫化钼的平板状圆形纳米机械振子系统示意图;(b)单层二硫化钼的结构示意图;
(c)二硫化钼中激子-振子耦合的能级示意图

Fig. 1 (a) Diagram of a plate-like circular nanomechanical oscillator system based on monolayer MoS_2 ;
(b) structural diagram of monolayer MoS_2 ; (c) energy-level diagram of exciton-oscillator coupling in MoS_2

研究者们已经从实验上^[26-27]和理论上^[28-29]研究了大体积多层和单层二硫化钼的振动特性。基于二硫化钼的纳米器件的结构非线性和不对称性会引起新的机械振动^[30],为了便于分析,这里依然仅考虑如图 1(a)所示的基于单层二硫化钼的纳米机械振子系统。该结构中的最低能量共振对应本征模式的弯曲,由于振子的品质因子高,因此振子的寿命比较长。相比本征模式的机械共振,新的机械共振引起的边缘效应和不规则结构可以忽略。二硫化钼本征模式的振动频率可以表示为

$$\omega_m = \left(\frac{kd}{2}\right) \sqrt{\frac{16D}{\rho_v d^4} \left[\left(\frac{kd}{2}\right)^2 + \frac{\gamma d^4}{4D} \right]} \quad (1)$$

式中 k 为模参数; d 为圆膜片直径; γ 为材料张力; ρ_v 为材料体密度; D 为抗弯刚度, $D = E_r t^3 / [12(1 - \nu^2)]$, 其中 E_r 为弹性模量, t 为单层厚度, ν 为泊松比。模参数与圆膜片直径(即 Si/SiO₂ 基底内圆环的直径)的关系式为 $kd/2 = \alpha + (\phi - \alpha) \exp(-\eta e \rho \ln x)$, 其中 $x = \gamma d^2 / 4D$, $\alpha = 14.682$, $\phi = 21.26$, $\eta = 0.6613$, $\rho = 0.5273$ ^[31]。机械本征模式可以用量化简谐振子描述为 $H_{NR} = \hbar \omega_m (a^+ a + 1/2)$, 其中 a^+ 和 a 分别为玻色的产生和湮灭算符, ω_m 为振子频率, \hbar 为普朗克常量。

由于单层二硫化钼属于直接带隙半导体, 使用由基态 $|g\rangle$ 和单个激发态 $|e\rangle$ 组成的二能级系统来描述基于单层二硫化钼的纳米机械振子系统中激子与振子的耦合。二能级激子用赝 $-1/2$ 算符 S^\pm 和 S^z 来描述, 其对易关系式为 $[S^z, S^\pm] = \pm S^\pm$ 和 $[S^+, S^-] = 2S^z$ 。局域二能级激子的哈密顿量 $H_e = \hbar \omega_e S^z$, ω_e 为激子的频率。形变势的相互作用可引起单层二硫化钼的纳米机械振子系统中激子与振子的耦合^[32]。振子与二能级激子相互作用的哈密顿量 $H_{NR-e} = \hbar \omega_m \beta S^z (a^+ + a)$, β 为耦合强度。

近年来, 光学抽运-探测技术逐渐成为研究光与物质相互作用的有效方法。光学抽运-探测技术采用一束强的抽运光和一束较弱的探测光来实现机械振子频率的测量。当两束光同时照射到被研究的系统上时, 较强的抽运光用于激发系统产生光学相干效应, 较弱的探测光用作探测, 通过探测吸收谱可观测到系统的线性和非线性光学效应。将该方法作用到二硫化钼振子系统上时, 激子与两束光相互作用的哈密顿量 $H_{P-ex} = -\mu \sum_{j=c,s} E_j (S^+ e^{-i\omega_j t} + S^- e^{i\omega_j t})$, 其中 μ 为激子的偶极矩, E_j 为两束光的强度。以抽运光的频率 ω_c 作为旋转坐标, 计算得到系统的哈密顿量为

$$H = \hbar \Delta_c S^z + \hbar \omega_m a^+ a + \hbar \omega_m \beta S^z (a^+ + a) - \mu E_c (S^+ + S^-) - \mu E_s (S^+ e^{-i\delta t} + S^- e^{i\delta t}), \quad (2)$$

式中 Δ_c 为激子频率与抽运光频率的失谐量, $\Delta_c = \omega_e - \omega_c$; δ 为探测光与抽运光之间的失谐量, $\delta = \omega_s - \omega_c$ 。基于海森堡运动方程, 并引入相应的阻尼项和噪声项, 得到朗之万方程为

$$dS^z/dt = -\Gamma_1 (S^z + 1/2) + i\Omega_c (S^+ - S^-) + \frac{i\mu E_s}{\hbar} (S^+ e^{-i\delta t} - S^- e^{i\delta t}), \quad (3)$$

$$dS^-/dt = -[i(\Delta_c + \omega_m \beta N) + \Gamma_2] S^- + 2i\Omega_c S^z - \frac{2i\mu S^z E_s}{\hbar} e^{-i\delta t} + \hat{\tau}_{in}(t), \quad (4)$$

$$\frac{d^2 N}{dt^2} + \gamma_m \frac{dN}{dt} + \omega_m^2 N = -2\omega_m^2 \beta S^z + \hat{\zeta}(t), \quad (5)$$

式中 N 为位置算符, $N = a^+ + a$; Γ_1 (Γ_2) 为激子的弛豫速率(相移率); γ_m 为振子的衰减率, $\gamma_m = \omega_m / Q$; Ω_c 为抽运场的拉比频率, $\Omega_c = \mu E_c / \hbar$; $\hat{\tau}_{in}(t)$ 为与 δ 关联的朗之万噪声算符, 其平均值 $\langle \hat{\tau}_{in}(t) \rangle = 0$, 关联函数为 $\langle \hat{\tau}_{in}(t) \hat{\tau}_{in}^\dagger(t') \rangle \sim \delta(t - t')$ 。振子模式受随机力的影响, 则关联函数可表示为

$$\langle \hat{\zeta}^+(t) \hat{\zeta}^\dagger(t') \rangle = \frac{\gamma_m}{\omega_m} \int \frac{d\omega}{2\pi} \omega \exp[-i\omega(t - t')] \left[1 + \coth\left(\frac{\hbar \omega}{2k_B T}\right) \right], \quad (6)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为该耦合系统的库温度。

在强耦合条件下, 每一个算符可以重新写成稳态平均值和一个小的涨落之和, 即 $O = O_0 + \delta O$ ($O = S^z, S^-, N$)。将该算符代入(3)~(5)式中并且忽略非线性项, 得到关于稳态平均值和小的涨落两组方程。稳态平均值由 N_0 和 S_0 构成, 它们决定了激子的粒子数反转($\omega_0 = 2S_0^z$), 则有

$$\Gamma_1 (\omega_0 + 1) [\Gamma_2^2 + (\Delta_c - \beta^2 \omega_m \omega_0)^2] + 4\Omega_c^2 \omega_0 \Gamma_2 = 0. \quad (7)$$

对于涨落较小的一组方程, 作变换 $\langle \delta O \rangle = O_+ e^{-i\delta t} + O_- e^{i\delta t}$, 解方程得到线性光学极化率 $\chi_{eff}^{(1)}(\omega_s) = \mu S_+ (\omega_s) / E_s = \Sigma_1 \chi^{(1)}(\omega_s)$, 其中 $\Sigma_1 = \mu^2 / \hbar \Gamma_2$, 得到 $\chi^{(1)}(\omega_s)$ 的表达式为

$$\chi^{(1)}(\omega_s) = \frac{i(\Gamma_2 - i\Delta_2) [S_0^* \Pi_1 - \omega_0 (\Gamma_1 - i\delta)] \Gamma_2 - \omega_0 \Omega_c \Pi_2 \Gamma_2}{[(\Gamma_1 - i\delta)(\Gamma_2 - i\Delta_2) - i\Omega_c \Pi_2] (i\Delta_1 + \Gamma_2) + i\Omega_c \Pi_1 (\Gamma_2 - i\Delta_2)}, \quad (8)$$

式中 $\chi = -2\omega_m^2 \beta / (\omega_m^2 - \delta^2 - i\delta \gamma_m)$, $\Delta_1 = \Delta_c - \delta + \omega_m \beta N_0$, $\Delta_2 = \Delta_c + \delta + \omega_m \beta N_0$, $\Pi_1 = -i(\omega_m \beta S_0 \chi + 2\Omega_c)$, $\Pi_2 = i(\omega_m \beta S_0^* \chi + 2\Omega_c)$ 。 $\chi^{(1)}(\omega_{pr})$ 的实部和虚部分别代表耗散和吸收。

3 数值结果与讨论

基于单层二硫化钼的纳米机械振子系统的参数为^[20,23]:弹性模量 $E_r=0.2$ TPa, 单层二硫化钼的厚度 $t=0.65$ nm, 圆膜片的直径 $d=1$ μm , 压力 $\epsilon\approx 3\%$, 材料张力 $\gamma=4.2$ N/m, 泊松比 $\nu=0.165$, 体密度 $\rho_v=5.06$ g/cm³. 由上述参数计算可得二硫化钼纳米振子的振动频率 $\omega_m\approx 1.2$ GHz, 有效质量 $M=2.582\times 10^{-16}$ kg, 激子的相移率 $\Gamma_2=0.5$ GHz^[33], 振子的品质因子 $Q_0=2000$, 振子的衰变率 $\gamma_m=\omega_m/Q_0$.

图 2 为失谐量 $\Delta_c=0$ 时, 线性光学极化率的虚部 ($\text{Im}\chi^{(1)}$), 即探测吸收与探测光-激子失谐量 $\Delta_s=\omega_s-\omega_c$ 的函数关系。图 2 中吸收谱线两边出现尖锐峰值的位置处对应振子的频率, 中间部分对应二硫化钼振子中激子的吸收。引入修饰态理论可以解释图 2 中的现象。二能级激子被二硫化钼纳米振子的声子模式所修饰, 原始的本征态 $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 被修饰后形成一些修饰态 $|g,n\rangle$ 、 $|g,n+1\rangle$ 、 $|e,n\rangle$ 和 $|e,n+1\rangle$, 其中 n 为声子模式的数态。图 2 中左边尖锐的峰位于 -1.2 GHz 处, 对应电子从低修饰态 $|g,n\rangle$ 、 $|g,n+1\rangle$ 到高修饰态 $|e,n\rangle$ 、 $|e,n+1\rangle$ 的跃迁。该过程同时吸收两个抽运光子, 发射出一个频率为 $\omega_c-\omega_m$ 的光子。右边位于 1.2 GHz 处的尖锐峰则对应 $|g,n\rangle$ 到 $|e,n+1\rangle$ 的跃迁, 该过程是由 ac-斯塔克效应诱导的激子共振吸收引起的。图 2 中曲线的中间部分是由二硫化钼振子诱导的受激瑞利共振引起的, 对应 $|g,n\rangle$ 到 $|e,n\rangle$ 的跃迁。图 2 中进一步考虑了二硫化钼振子的频率 $\omega_m\approx 1.5$ GHz 对应的吸收谱。由图 2 可知, 谱线的尖峰对应机械振子的频率, 基于该现象设计一种测量机械振子频率的全光学方法, 具体的测量过程包括两个步骤: 1) 固定探测-激子频率失谐量 $\Delta_c=0$, 即抽运场频率与激子频率相等; 2) 扫描第二束较弱的探测光, 在吸收谱线中观测到两个尖锐的峰, 尖峰出现的位置便对应振子的振动频率。因此, 通过观察吸收谱可以直接得到振子的振动频率。

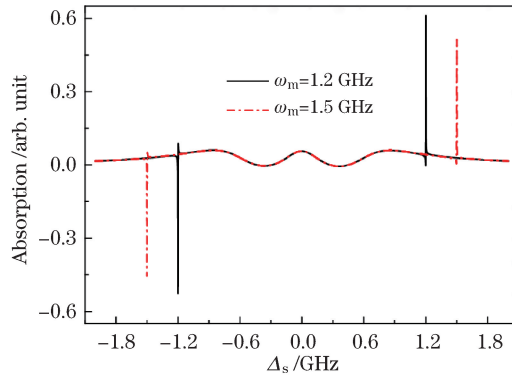


图 2 探测吸收与探测光-激子失谐量 Δ_s 的函数关系

Fig. 2 Probe absorption as a function of detuning Δ_s between detection light and excitation

调节激子-抽运光失谐量 Δ_c 从共振条件 ($\Delta_c=0$) 到红边带条件 ($\Delta_c=\omega_m$), 图 3(a) 为线性光学极化率的实部 (耗散) 和虚部 (吸收)。图 3(b) 为红边带条件下存在、不存在激子-振子的耦合时探测得到的透射谱。当不考虑激子-振子耦合时 ($\beta=0$), 探测得到的透射谱表现为洛伦兹线形, 如图 3(b) 中的黑色曲线所示; 当考虑激子-振子耦合时 ($\beta=0.1$), 探测得到的透射谱表现为类似光机械诱导透明的现象^[34], 如图 3(b) 的蓝色曲线所示, 该现象可称为声子诱导透明。声子诱导透明现象是由系统中激子与振子耦合引起的, 在耦合的机械振子系统^[35] 和双层石墨烯纳米带^[36] 中也可以观测到该现象, 这是由于当抽运-探测失谐量与二硫化钼振子的频率相等时, 产生了机械诱导的相干布局振荡^[37]。

激子-振子耦合在二硫化钼纳米机械振子系统中起着关键作用。目前, 通过实验无法测得激子-振子耦合强度的大小, 这里基于探测吸收谱提出了一种测量二硫化钼纳米机械振子系统中激子-振子耦合强度的光学方法。当 $\Delta_c=\omega_m$ 时, 存在和不存在激子-振子耦合时探测得到的吸收谱如图 4 所示。当不存在激子-振子耦合时, 探测吸收谱中呈现出典型的吸收峰值 (黑色曲线); 当存在激子-振子耦合时, 探测吸收谱出现了明显的分裂, 并且在 $\Delta_s=0$ 处吸收为零, 该现象类似于量子光学中二能级系统的 Rabi 分裂。当抽运-探测失谐量与振子频率相等时, 机械诱导的相干布局振荡使得 $\Delta_s=0$ 时对应的探测吸收谱中出现凹陷现象。由图 4(b) 可知, 两峰值之间的分裂宽度为激子-振子耦合强度的函数, 从而为该系统中激子-振子之

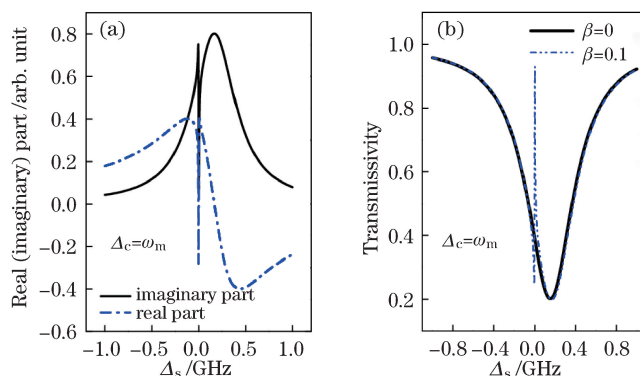


图 3 (a) 线性光学极化率的实部和虚部; (b) 在红边带条件下探测的透射谱

Fig. 3 (a) Real part and imaginary part of linear optical polarizability; (b) transmission spectra detected under the condition of red sideband

间耦合强度的确定提供了一种较为直接的测量方法。目前还未得到激子-振子耦合强度的具体实验参数,相关课题组对单层二硫化钼中电声子的相互作用进行了研究,发现掺杂后电声子耦合强度最大可以达到 1.7^[38]。基于探测吸收谱,提出了一种直观的方法来测量单层二硫化钼纳米机械振子系统中激子-振子的耦合强度。

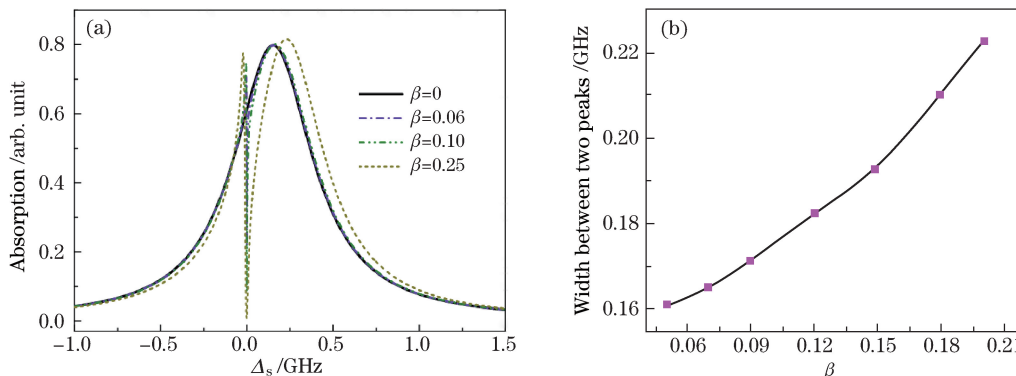


图 4 (a) $\Delta_c = \omega_m$ 时不同耦合强度下探测得到的吸收谱; (b) 吸收谱中两峰值之间的分裂宽度与耦合强度的关系

Fig. 4 (a) Absorption spectra detected under different coupling strength when $\Delta_c = \omega_m$; (b) variation in width between two peaks in absorption spectrum with coupling strength

研究二硫化钼振子的目的是实现质量传感。质量传感主要通过探测额外粒子沉积到纳米机械振子上引起的振子频移量来实现。当质量为 δm 的待测粒子沉积到质量为 M 的纳米机械振子上时 ($M \gg \delta m$), 振子的振动频率由 ω_m 移动至 $\omega_m + \delta f_0$, 通过探测频移量 δf_0 , 便可以通过关系式 $\delta m = (2M/\omega_m)\delta f_0$ 得到沉积到振子表面的粒子。实验上利用一种喷嘴孔径装置来产生粒子控制流, 从而将待测粒子沉积到纳米振子表面, 研究人员已经在实验上证实了这种将待测粒子沉积到纳米机械振子表面的方法^[39]。质量传感包括两个过程: 1) 根据探测吸收谱, 确定振子的振动频率 ω_0 ; 2) 利用喷嘴孔径装置, 将待测粒子沉积到纳米机械振子表面, 重复过程 1), 得到新的振动频率 ω_1 。新的频率与机械振子的初始频率相比, 产生了 δf_0 ($\delta f_0 = \omega_1 - \omega_0$) 的频移。利用待测粒子的质量与频移的关系式便可得到待测粒子的质量。由于机械振子的质量远大于待测粒子的质量 ($M \gg \delta m$), 可以假定待测粒子不会影响振子的弹性系数和系统中的耦合强度。

以流感病毒 ($m_{iv} = 0.512 \text{ fg}$) 为例阐述光学质量传感方案。传统测量病毒的方法是通过质谱仪实现的, 该方法需要生物分子带电, 而带电过程会破坏生物分子, 不利于进一步的研究。基于抽运-探测技术的全光学质量传感方案可以有效克服该缺点。将待测生物分子沉积到二硫化钼机械振子上, 测量振子的新频率。如图 5 所示, 首先将单个流感病毒沉积到二硫化钼机械振子上可以观测到吸收谱中新的频率 (绿色曲线) 相对于机械振子的初始频率 (黑色曲线) 产生频移 ($\delta f_0 = 1.2 \text{ MHz}$)。根据频移与沉积质量之间的关系式, 可以较直接地测量出额外粒子的质量。图 5 中的蓝色曲线对应 5 个流感病毒沉积到二硫化钼机械振子表面的情

况。图 5(b)呈现了频移与沉积到振子上生物分子数量之间的线性关系,图中的正斜率表示振子的质量灵敏度;一旦确定了振子频率,也可通过斜率来估测振子的质量。

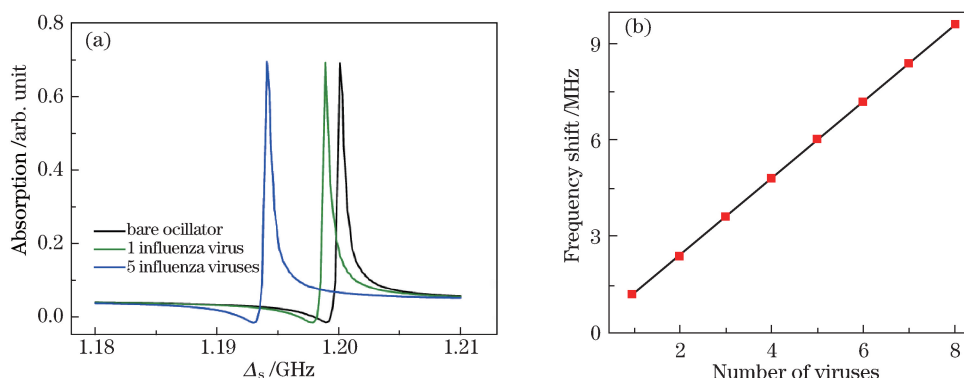


图 5 (a)二硫化钼振子上存在和不存在沉积生物分子时的吸收谱;
(b)振子频移与沉积到振子上的病毒颗粒数目之间的线性关系

Fig. 5 (a) Absorption spectra with and without deposited biomolecules on the surface of MoS₂ oscillator;
(b) relationship between frequency shift of oscillator and the number of deposited biomolecules on oscillator

引入质量响应率($R = \omega_m / 2M$)来估测质量传感的灵敏度。显然,振子的小质量、高振动频率和高品质因子可以有效提高质量传感的灵敏度。对于真实的单层二硫化钼结构,其尺寸会引起一些参数(比如质量、品质因子、激子-振子耦合强度和相移率)在很大范围内的变化,从而影响质量传感的灵敏度。激子-振子耦合在该系统中起着关键的作用,如果耦合强度 $\beta > 0.09$,相干光学效应将会显著增强,从而有益于传感性能的提高。激子的相移率和振子寿命也会影响传感性能。然而,与室温下的质谱仪相比,该系统存在的缺点为实验需要在较低温度下进行,若该系统工作在室温下,质量传感的灵敏度将会降低。

假定沉积在机械振子上的生物分子是均匀分布在纳米振子上的。实际上,振子频移取决于沉积在纳米机械振子上的质量和待测粒子在纳米振子上的位置。对于该二硫化钼纳米振子系统,最大的频移出现在振子中央,最小的频移则出现在振子边缘^[37]。已经有研究小组对单个纳米颗粒的吸收或全体连续单分子吸收进行了研究,利用概率事件的直方图与频移的函数关系来研究频移的统计分布^[40]。

需要指出的是,各种噪声源(包括本质噪声和外在噪声)^[41-42]影响二硫化钼纳米机械振子的质量传感性能。一般地,机械运动的热噪声为主要噪声源,影响传感灵敏度;当传感器件工作在较低温度下时,该噪声得到有效减小。与传统的质谱仪相比,全光学非线性质量传感方案不需要待测粒子被电离,可以通过光学谱直接测量,从而有效克服电学测量过程中产生的热效应。利用光学抽运-探测技术产生拍频以驱动机械振子,该方法对于高频和低频的纳米机械振子都适用。机械振子的寿命较长,有利于提高传感的精确度。该质量传感方案为单个分子或者单个原子的测量提供了一种可行的方法。

4 结 论

提出了一种基于单层二硫化钼的纳米机械振子系统,研究了该系统中的相干光学特性。该系统中的激子-振子耦合可诱导产生声子诱导透明现象。二硫化钼机械振子光学性能的研究,对于二硫化钼在基于二硫化钼的光学三极管以及光克尔开关等方面的应用具有重要意义。此外,基于相干光谱学,提出了一种测量激子-振子耦合强度的方案和测量机械振子频率的光学方法。基于相干光谱学,进一步呈现了一种基于单层二硫化钼材料的全光学质量传感方案,该方案有望应用于生物分子的检测以及基于二硫化钼的全光学器件中。

参 考 文 献

- [1] Geim A K. Graphene: Status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [2] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R, *et al.* The electronic properties of graphene[J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(1): 109-162.
- [3] Lee C, Wei X, Kysar J W, *et al.* Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene

- [J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [4] Eichler A, Moser J, Chaste J, *et al.* Nonlinear damping in mechanical resonators made from carbon nanotubes and grapheme[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(6): 339-342.
- [5] Wehling T O, Novoselov K S, Morozov S V, *et al.* Molecular doping of grapheme[J]. Nano Letters, 2008, 8(1): 173-177.
- [6] Chen C, Rosenblatt S, Bolotin K I, *et al.* Performance of monolayer graphene nanomechanical resonators with electrical readout[J]. Nature Nanotechnology, 2009, 4(12): 861-867.
- [7] Buscema M, Barkelid M, Zwiller V, *et al.* Large and tunable photothermoelectric effect in single-layer MoS₂ [J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 358-363.
- [8] Novoselov K S, Fal V I, Colombo L, *et al.* A roadmap for grapheme[J]. Nature, 2012, 490(7419): 192-200.
- [9] Li X, Zhang F, Niu Q. Unconventional quantum Hall effect and tunable spin Hall effect in Dirac materials: Application to an isolated MoS₂ trilayer[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(6): 066803.
- [10] Song Y, Dery H. Transport theory of monolayer transition-metal dichalcogenides through symmetry [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(2): 026601.
- [11] He K, Poole C, Mak K F, *et al.* Experimental demonstration of continuous electronic structure tuning via strain in atomically thin MoS₂ [J]. Nano Letters, 2013, 13(6): 2931-2936.
- [12] Mak K F, Lee C, Hone J, *et al.* Atomically thin MoS₂: A new direct-gap semiconductor[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(13): 136805.
- [13] Lee H S, Min S W, Chang Y G, *et al.* MoS₂ nanosheet phototransistors with thickness-modulated optical energy gap [J]. Nano Letters, 2012, 12(7): 3695-3700.
- [14] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, *et al.* Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂ [J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(7): 497-501.
- [15] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, *et al.* Single-layer MoS₂ transistors[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(3): 147-150.
- [16] Qiu H, Pan L, Yao Z, *et al.* Electrical characterization of back-gated bi-layer MoS₂ field-effect transistors and the effect of ambient on their performances[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(12): 123104.
- [17] Zhong Wenxue, Wang Yiping, Cheng Guangling. Nanomechanical-resonator-assisted induced optical switching in quantum dot system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0827001.
钟文学, 王一平, 程广玲. 量子点系统中纳米机械振子诱导的光开关[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0827001.
- [18] Liao Qinghong, Zheng Qinghua, Yan Qiurong, *et al.* Study on entropy squeezing of the atom in an atom-cavity-optomechanical system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0218001.
廖庆洪, 郑庆华, 鄢秋荣, 等. 原子-腔光学系统中原子熵压缩的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0218001.
- [19] Fontana M, Deppe T, Boyd A K, *et al.* Electron-hole transport and photovoltaic effect in gated MoS₂ Schottky junctions[J]. Sci Rep, 2013, 3: 1634-1639.
- [20] Lee J, Wang Z, He K, *et al.* High frequency MoS₂ nanomechanical resonators[J]. ACS Nano, 2013, 7(7): 6086-6091.
- [21] Bertolazzi S, Brivio J, Kis A. Stretching and breaking of ultrathin MoS₂ [J]. ACS Nano, 2011, 5(12): 9703-9709.
- [22] Castellanos-Gomez A, Poot M, Steele G A, *et al.* Elastic properties of freely suspended MoS₂ nanosheets [J]. Advanced Materials, 2012, 24(6): 772-775.
- [23] Castellanos-Gomez A, van Leeuwen R, Buscema M, *et al.* Single-layer MoS₂ mechanical resonators[J]. Advanced Materials, 2013, 25(46): 6719-6723.
- [24] Perkins F K, Friedman A L, Cobas E, *et al.* Chemical vapor sensing with monolayer MoS₂ [J]. Nano Letters, 2013, 13(2): 668-673.
- [25] Late D J, Huang Y K, Liu B, *et al.* Sensing behavior of atomically thin-layered MoS₂ transistors [J]. ACS Nano, 2013, 7(6): 4879-4891.
- [26] Lee C, Yan H, Brus L E, *et al.* Anomalous lattice vibrations of single-and few-layer MoS₂ [J]. ACS Nano, 2010, 4(5): 2695-2700.
- [27] Kioseoglou G, Hanbicki A T, Currie M, *et al.* Valley polarization and intervalley scattering in monolayer MoS₂ [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(22): 221907.
- [28] Molina-Sanchez A, Wirtz L. Phonons in single-layer and few-layer MoS₂ and WS₂ [J]. Physical Review B, 2011, 84(15): 155413.

- [29] Li T. Ideal strength and phonon instability in single-layer MoS₂[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(23): 235407.
- [30] Wang Z, Lee J, He K, *et al.* Embracing structural nonidealities and asymmetries in two-dimensional nanomechanical resonators[J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 3919-3925.
- [31] Suzuki H, Yamaguchi N, Izumi H. Theoretical and experimental studies on the resonance frequencies of a stretched circular plate: Application to Japanese drum diaphragms[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2009, 30(5): 348-354.
- [32] Mahan G D. *Many-particle physics*[M] 3rd ed. New York: Plenum, 1981.
- [33] Chen H J, Zhu K D. Coherent optical responses and their application in biomolecule mass sensing based on a monolayer MoS₂ nanoresonator[J]. *J Opt Soc Am B*, 2014, 31(7): 1684-1690.
- [34] Weis S, Rivière R, Deléglise S, *et al.* Optomechanically induced transparency[J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1520-1523.
- [35] Okamoto H, Gourgout A, Chang C Y, *et al.* Coherent phonon manipulation in coupled mechanical resonators[J]. *Nature Physics*, 2013, 9(8): 480-484.
- [36] Yan H, Low T, Guinea F, *et al.* Tunable phonon-induced transparency in bilayer graphene nanoribbons[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4581-4586.
- [37] Li J J, Zhu K D. All-optical mass sensing with coupled mechanical resonator systems[J]. *Physics Reports*, 2013, 525(3): 223-254.
- [38] Ge Y, Liu A Y. Phonon-mediated superconductivity in electron-doped single-layer MoS₂: A first-principles prediction [J]. *Physical Review B*, 2013, 87(24): 241408.
- [39] Yang Y T, Callegari C, Feng X L, *et al.* Zeptogram-scale nanomechanical mass sensing[J]. *Nano Letters*, 2006, 6(4): 583-586.
- [40] Naik A K, Hanay M S, Hiebert W K, *et al.* Towards single-molecule nanomechanical mass spectrometry[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(7): 445-450.
- [41] Yie Z, Zielke M A, Burgner C B, *et al.* Comparison of parametric and linear mass detection in the presence of detection noise[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(2): 025027.
- [42] Turner K L, Burgner C, Yie Z, *et al.* Nonlinear dynamics of MEMS systems[J]. AIP Publishing, 2011, 1339(1): 111-113.