

基于超强耦合量子点-纳米机械振子系统的全光学质量传感*

杨建勇 陈华俊†

(安徽理工大学力学与光电物理学院, 淮南 232001)

(2019年4月24日收到; 2019年10月15日收到修改稿)

提出一种复合量子点-纳米机械振子系统, 该系统以半导体芯片为基底, 量子点嵌入倒置半导体圆锥纳米线的底端, 通过光学抽运-探测技术来驱动量子点-纳米机械振子系统, 研究该系统中的相干光学特性. 通过探测吸收谱给出确定机械振子频率和量子点-纳米机械振子耦合强度的全光学方法. 此外, 基于该系统理论上提出一种在室温下的全光学质量传感方案. 通过测量吸收谱中附着在机械振子上纳米颗粒的质量引起的共振频移, 可间接测出额外纳米颗粒的质量. 与先前的复合纳米机械振子系统相比, 系统中的激子-声子耦合强度的数值可与振子频率比拟, 可实现超强耦合, 有利于相干光学特性的观测, 在超高精度及高分辨率质量传感器件方面有着潜在应用.

关键词: 量子点, 纳米机械振子, 质量传感**PACS:** 63.22.-m, 78.67.Hc, 73.22.-f**DOI:** 10.7498/aps.68.20190607

1 引言

纳米机械振子不仅具有极小的质量和体积, 而且还有较高的振动频率和品质因数等优点, 因此被广泛地应用到传感器领域^[1]. 近年来, 石墨烯纳米带、纳米碳管、二硫化钼等材料的纳米机械振子被用来制作质量传感器, 在质量传感方面的应用取得了很大的进步, 但测量环境都被限制在超低温下. Yeo等^[2]提出半导体锥形纳米线包埋量子点构成的一种新型的由材料应变介导耦合的混合系统, 该系统具有非常高的集成水平、全光学接口以及低温兼容性的优点^[2-5]. 除此之外, 它还有与机械振子振动频率差不多大的耦合强度以及较长的自旋寿命, 这样的耦合机制为实现室温下单个自旋的量子非破坏性测量提供了可能性^[6-9]. 基于该系统本文提出了一种室温下全光学的质量传感方案.

基于纳米机械振子与量子点耦合而成的光学传感器比传统的电学质量传感器表现出了更多的优良性能^[10-13]. 过去的电学测量法需要先将被测物电离, 然后根据电荷和质量的关系, 将被测物在真空中分离后, 分析被测物的成分才能够进行测量^[14]. 这种测量方式需要使被测物带电后进行电离才能测量, 因此不适于一些不能带电物质的测量, 另外电离还有可能破坏被测物的成分. 随着科技的发展, 电学质谱仪被提出来. 在这种测量方法中, 被测物可以不用强行带电, 只需对纳米机械振子通电, 振子表面的被测物会随着因电流激励而振动的振子振动, 然后通过测量就可以得到振子振动频率的变化, 进而可得到被测物的质量^[15]. 然而该电学测量方式会因为电流产热和能量损失而影响测量结果, 而且该方案只适用于低频机械振子系统. 随后, 一些基于碳纳米管和石墨烯等材料的纳米机械振子的光学质谱仪被提出来. 这些质谱仪相比传统

* 国家自然科学基金 (批准号: 11804004, 11647001) 和安徽省自然科学基金 (批准号: 1708085QA11) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenphysics@126.com

的电质谱仪有很大的优越性,如不会引发由电路引起的热效应和能量损失,测量结果更加准确,灵敏度更高;与单束光驱动的质谱仪相比,不受频率的限制^[16].但是,这些质量传感器在质量测量过程中都需要在超低温环境下进行.

基于量子点被镶嵌在半导体倒圆锥纳米线的超强耦合系统^[2],提出一种全光学质量传感器.在一束强抽运光和一束弱探测光的作用下,量子点能表现出很强的局域效应和量子效应^[15].实验上已证明该系统具有室温下单个量子非破坏性测量的可能性^[17–21].因此,该系统可以用于在室温条件下质量传感的测量.研究抽运光和探测光作用于该系统的光学效应,理论上提出一种超强耦合量子点-纳米机械系统中测量振子频率和耦合常数的方法,并且给出相应的解释^[22,23].利用探测光场的吸收光谱,可以得到沉淀在纳米机械振子自由端表面粒子和系统的振动频率,然后用振子频率的变化量与粒子质量的关系式进行计算即可得到粒子的质量^[24–26].

2 模型与理论

图1是量子点嵌入半导体倒圆锥纳米线耦合而成的系统示意图.量子点被嵌入一个长约18 μm的倒圆锥纳米线中,然后直立在1个半导体芯片上,纳米线可以进行横向的弯曲振动^[2,3].该系统的整体结构紧凑,不需要外部部件来调节量子点与纳米线之间的耦合强度,也不需要外部磁场来驱动耦合.在该系统中,圆锥形纳米线机械振子不仅能实现超强的量子点-机械振子耦合,而且圆锥形纳米线相当于一个波导管,能够把光局限在波导管中,

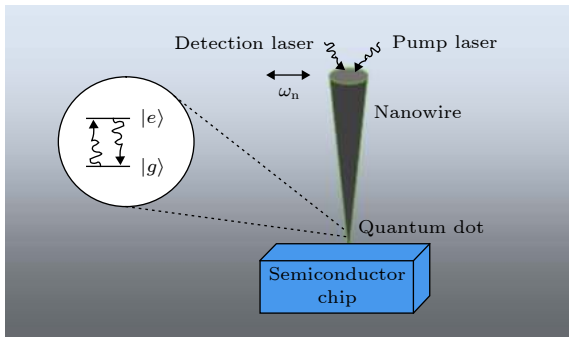


图1 基于超强耦合量子点-纳米机械振子的系统示意图
Fig. 1. Schematic diagram of the system based on super-strong coupling quantum dot-nanometer mechanical oscillator.

增强光与物质的相互作用.量子点越靠近纳米线的侧壁,耦合强度越大,改变量子点的位置可使耦合强度达到超强耦合标准的6倍^[9].

在圆锥纳米线中嵌入的半导体纳米量子点,又被称为“人造原子”.因为它具有量子化的电子能级结构,所以可以被认为是一个由基态 $|g\rangle$ (无激子)和激发态 $|e\rangle$ (单激子)组成的二能级系统^[15].在一束探测光(频率为 ω_c)和一束抽运光(频率为 ω_s)作用下,复合量子点-纳米机械振子系统可以简单看成一个激子与声子耦合的系统,由独立自旋玻色子 $-1/2$ 算符 S^\pm 和 S^z 可以很好地来描述^[22].二能级量子点中激子的频率为 ω_e ,其哈密顿量可以表示成 $H_e = \hbar\omega_e S^z$,而纳米机械振子的哈密顿量可以表示为 $H_n = \hbar\omega_n a^\dagger a$,其中 ω_n 为纳米机械振子的频率, $a^\dagger(a)$ 为振子产生(湮灭)的算符.二能级激子与纳米机械振子通过形变势能相互作用的哈密顿量为 $H_{n-e} = \hbar g_0 S^z (a^\dagger + a)$, g_0 为机械振子与二能级激子的耦合强度.

当一束抽运光和探测光照射到二能级系统时,激子与两束光进行相互作用的哈密顿量为

$$H_{e-p} = -\mu E_{pu} (S^+ e^{-i\omega_{pu}t} + S^- e^{i\omega_{pu}t}) - \mu E_{pr} (S^+ e^{-i\omega_{pr}t} + S^- e^{i\omega_{pr}t}).$$

在两束光的驱动下,二能级激子与纳米机械振子耦合后的哈密顿方程为^[23]

$$H = \hbar\omega_e S^z + \hbar\omega_n a^\dagger a + \hbar g_0 S^z (a^\dagger + a) - \mu E_{pu} (S^+ e^{-i\omega_{pu}t} + S^- e^{i\omega_{pu}t}) - \mu E_{pr} (S^+ e^{-i\omega_{pr}t} + S^- e^{i\omega_{pr}t}), \quad (1)$$

式中, $\hbar\omega_e$ 为二能级激子的能量; $\hbar\omega_n$ 为纳米机械振子的能量; S^+ 和 S^- 是二能级激子的产生和湮灭算符,它们的对易关系满足 $[S^+, S^-] = 2S^z$, $[S^z, S^\pm] = \pm S^\pm$; g_0 为二能级激子与机械振子的耦合强度; μ 为电偶极矩;后面两项是抽运光和探测光与二能级激子的相互作用项; ω_{pu} 和 ω_{pr} 分别是两束光的频率.下面以频率为 ω_{pu} 的抽运光作为旋转坐标进行变换,得到系统的哈密顿量为^[1]

$$H = \hbar\Delta_0 S^z + \hbar\omega_n a^\dagger a + \hbar g_0 S^z (a^\dagger + a) - \mu E_{pu} (S^+ + S^-) - \mu E_{pr} (S^+ e^{-i\delta t} + S^- e^{i\delta t}), \quad (2)$$

式中, $\Delta_0 = \omega_e - \omega_{pu}$ 为激子的频率与抽运光频率的失谐量, $\delta = \omega_{pr} - \omega_{pu}$ 为探测光和抽运光的失谐量.

采用海森伯运动方程求解哈密顿量 (2), 得到如下方程:

$$\frac{dS^z}{dt} = -\Gamma_1(S^z + 1/2) + i\Omega_0(S^+ - S^-) + \frac{i\mu E_{pr}}{\hbar}(S^+ e^{-i\delta t} - S^- e^{i\delta t}), \quad (3)$$

$$\frac{dS^-}{dt} = -[\Gamma_2 + i(\Delta_0 + g_0 N)]S^- - 2i\Omega_0 S^z - \frac{2i\mu E_{pr}}{\hbar} S^z e^{-i\delta t}, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 N}{dt^2} + \gamma_n \frac{dN}{dt} + \omega_n^2 N = -2\omega_n g_0 S^z, \quad (5)$$

式中, $N = a^+ + a$ 为位置算符, Γ_1 为二能级激子的弛豫率, Γ_2 为二能级激子的退相干率, $\Omega_0 = \mu E_{pu}/\hbar$

为抽运光场的拉比频率, $\gamma_n = \omega_n/Q$ 表示纳米机械振子的衰减率. 对上面 3 个方程做半经典处理近似得^[15]

$$S^z = S_0^z + S_1^z e^{-i\delta t} + S_{-1}^z e^{i\delta t}, \quad (6)$$

$$S^- = S_0^- + S_1^- e^{-i\delta t} + S_{-1}^- e^{i\delta t}, \quad (7)$$

$$N = N_0 + N_1 e^{-i\delta t} + N_{-1} e^{i\delta t}. \quad (8)$$

把 (6)–(8) 式代入方程 (3)–(5) 可以得到一阶线性极化率:

$$\chi_{\text{eff}}^{(1)}(\omega_{pr}) = \frac{\mu S_1}{E_{pr}} = \frac{\mu^2}{\hbar \Gamma_2} \chi^{(1)}(\omega_{pr}) = \sum_1 \chi^{(1)}(\omega_{pr}), \quad (9)$$

式中 $\chi^{(1)}(\omega_{pr})$ 的表达式为

$$\chi^{(1)}(\omega_{pr}) = \frac{i(\Gamma_2 - i\Delta_2)[S_0^* \Pi_1 - \omega_0(\Gamma_1 - i\delta)]\Gamma_2 - \omega_0 \Omega_0 \Pi_2 \Gamma_2}{[(\Gamma_1 - i\delta)(\Gamma_2 - i\Delta_2) - i\Omega_0 \Pi_2](i\Delta_1 + \Gamma_2) + i\Omega_0 \Pi_1(\Gamma_2 - i\Delta_2)}, \quad (10)$$

其中,

$$\omega_0 = 2S_0^z, \quad N_0 = -g_0 \omega_0 / \omega_n, \quad \Delta_1 = \Delta_0 - \delta + g_0 N_0,$$

$$\Delta_2 = \Delta_0 + \delta + g_0 N_0, \quad \Pi_1 = -i(g_0 S_0 X + 2\Omega_0),$$

$$S_0 = \frac{-i\Gamma_2 \Omega_0 \omega_0 + \Omega_0 \omega_0 \left(\Delta_0 - g_0^2 \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)}{\Gamma_2^2 + \left(\Delta_0 - g_0^2 \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2},$$

$$\Pi_2 = i(g_0 S_0^* X + 2\Omega_0),$$

$$S_0^* = \frac{i\Gamma_2 \Omega_0 \omega_0 + \Omega_0 \omega_0 \left(\Delta_0 - g_0^2 \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)}{\Gamma_2^2 + \left(\Delta_0 - g_0^2 \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2},$$

$$X = -\frac{2\omega_n g_0 S_1^z}{\omega_n^2 - \delta^2 + i\delta \gamma_n}.$$

$\chi^{(1)}(\omega_{pr})$ 的实部代表耗散, 虚部代表吸收. 量子点的粒子数反转 ω_0 可由下式确定:

$$\Gamma_1(\omega_0 + 1) \left[\Gamma_2^2 + \left(\Delta_0 - g_0^2 \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2 \right] + 4\Omega_0^2 \omega_0 \Gamma_2 = 0. \quad (11)$$

由光学吸收与一阶线性极化率的虚部成正比的关系得到探测光场的吸收光谱, 进而研究机械振子的振动频率和耦合常数.

3 数值结果与讨论

在 Yeo 等^[2] 的实验中, 使用系统的参数为: 在

温度 $T = 5$ K 时, 振子频率 $\omega_n = 530$ kHz, 品质因数 $Q = 3000$; 在温度 $T = 300$ K (26.86 °C) 时, 振子频率 $\omega_n = 522.4$ kHz, 品质因数 $Q = 1000$.

图 2(a) 为失谐量 $\Delta_0 = 0$ 时, 在不同温度下探测吸收与探测光-激子失谐量 Δ_s 的光谱, 其中 $\Delta_s = \omega_{pr} - \omega_e$. 从图 2(a) 发现在振子频率 $\omega_n = 530$ kHz 和 $\omega_n = 520$ kHz 相差不大的情况下, 调节品质因数分别为 3000 和 1000, 图中仍具有同样的可读性. 相比于低温 (5 K) 环境下的吸收谱, 在室温 (300 K) 下, 吸收谱并没有因为环境温度的升高而难以观测. 换句话说, 即使在室温下, 吸收谱依然能观测到, 为该系统在室温下在质量传感方面的应用提供了理论基础. 图 2(b) 是在室温和低温下根据不同的振子频率得到的探测光的吸收谱, 可以发现, 在低温下吸收谱的峰值要比室温下的高一些. 环境温度越高, 机械振子受环境温度的影响而使得振动频率降低. 然而即使在室温下, 吸收谱中的信号仍然可以观测到 (如图 2(b) 中左图所示). 另外, 两个很明显的尖峰总是对应着纳米机械振子频率的位置, 而中间部分则表示的是振子中激子的吸收. 例如, 当振子频率为 $\omega_n = 0.50$ MHz 和 $\omega_n = 0.80$ MHz, 图 2(b) 中的蓝色曲线左右的两个尖峰分别对应着 $\Delta_s = \pm 0.50$ MHz 和 $\Delta_s = \pm 0.80$ MHz. 图中的尖峰会对应着纳米机械振子的频率, 针对这种情况, 提出一种精确测量机械振子频率的全光学方法. 具体的做

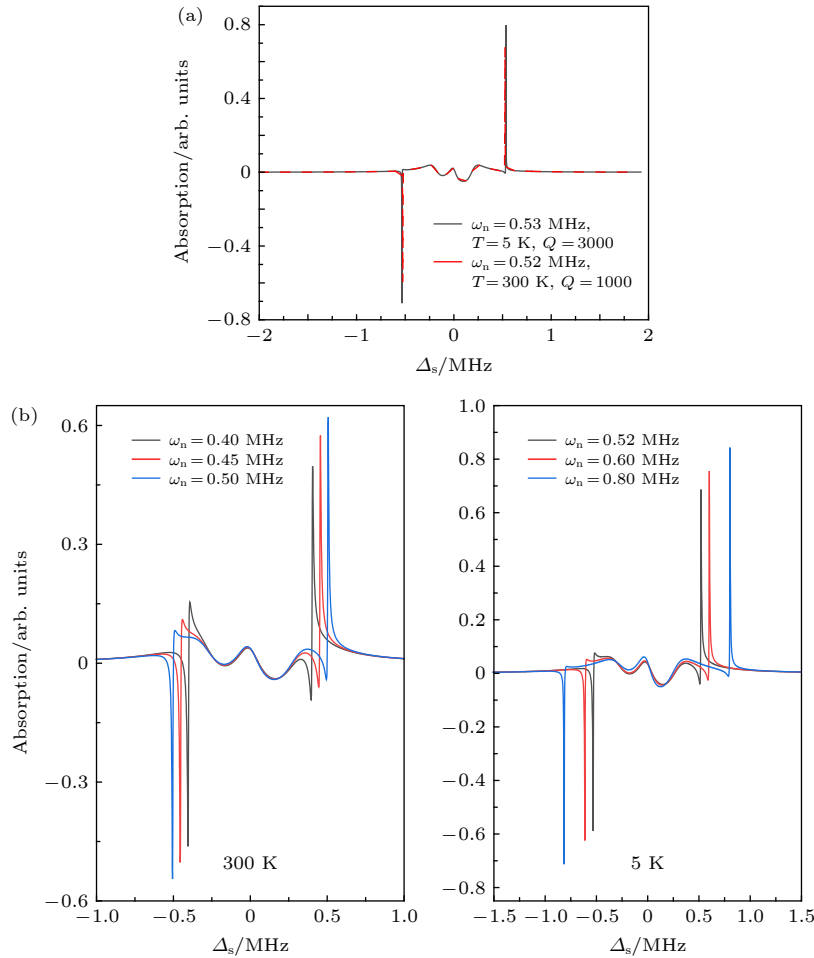


图 2 (a) 不同温度下探测吸收与探测光-激子失谐量 Δ_s 的函数关系; (b) 室温 (300 K) 和低温 (5 K) 下, 不同的振子频率时探测吸收与探测光-激子失谐量 Δ_s 的函数关系; 图中参数为 $\Gamma_1 = 0.1 \text{ MHz}$, $\Gamma_2 = 0.05 \text{ MHz}$, $\Omega_0^2 = 0.01 \text{ (MHz)}^2$, $\Delta_0 = 0$, $g_0 = 0.5\omega_n$

Fig. 2. (a) Function relationship between detection absorption and detection light-exciton detuning Δ_s at different temperatures; (b) the functional relationship between the detected absorption and the detector-exciton detuning Δ_s under different oscillator frequencies at room temperature and low temperature. $\Gamma_1 = 0.1 \text{ MHz}$, $\Gamma_2 = 0.05 \text{ MHz}$, $\Omega_0^2 = 0.01 \text{ (MHz)}^2$, $\Delta_0 = 0$, $g_0 = 0.5\omega_n$.

法是让第一束抽运光的频率与激子的频率相等, 即 $\Delta_0 = 0$, 然后用第二束较弱的探测光扫描激子的频率范围, 在探测光的吸收光谱会出现两个尖峰, 尖峰对应的横坐标即为机械振子的频率大小.

抽运本文是基于一个超强耦合系统, 耦合强度的大小为 $g_0 \approx \omega_n \beta$, β 为普通耦合系统中耦合强度的大小. 在文献 [7] 量子点的系统以及机械振子与量子点耦合的复合系统的相互作用强度 β 大小分别为 0.02 和 0.06, 而在本文所提出的系统中耦合强度大小换算的 β 大小范围为 0.5—0.8. 强耦合使得系统相互作用的范围更大, 且系统的现象更加明显. 图 3(a) 是不同耦合强度下的探测吸收谱, 当 g_0 为 0 时, 可以发现图中黑色线只有一个峰, 而 g_0 不为 0 时, 吸收谱就变成了两个峰. 两个峰之间的距离随着耦合强度的增大而增大. 通过测量双峰的分

裂宽度, 发现双峰宽度与耦合强度大小呈线性关系, 图 3(b) 给出量子点-振子耦合强度与双峰分裂宽度的线性关系. 依据此关系可以用来测量量子点与纳米机械振子之间耦合强度的大小. 基于该探测吸收谱, 呈现出一种直观的方法来确定量子点-纳米机械振子耦合强度.

另一方面, 研究该复合系统的目的是实现质量传感. 质量传感主要通过探测额外粒子附着到纳米机械振子上引起的振子频移量来实现的. 当有质量为 m 的粒子沉淀在振子的顶端表面时, 振子的振动频率就会发生改变. 系统质量的变化量 Δm 和放入粒子后引起的频移 Δf 的关系为 $\Delta m = 2M/\omega_n \Delta f$, 其中 M 为振子的有效质量 ($M \gg m$). 假设被测粒子能够均匀地落在振子顶端的表面, 则可以根据上面 Δm 和 Δf 的关系得到被测粒子的质量. 以

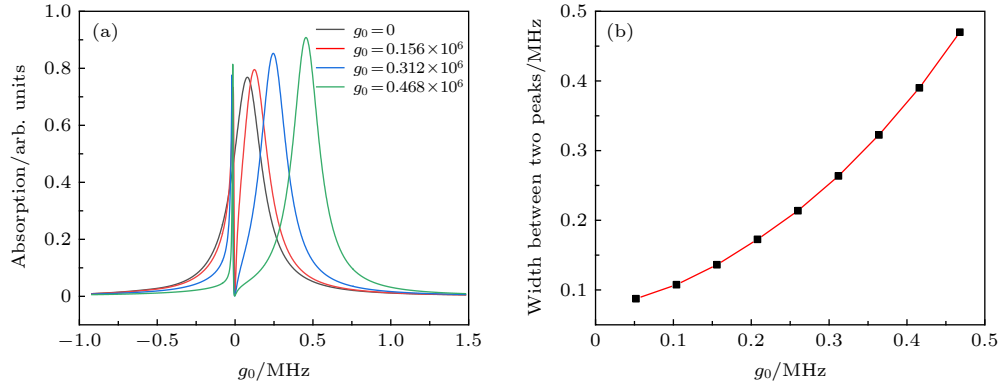


图 3 (a) $\Delta_0 = \omega_n$ 时不同耦合强度得到的探测吸收谱; (b) 吸收光谱中两峰的劈裂宽度与耦合强度的关系; 两图中参数均为 $\Gamma_1 = 0.2$ MHz, $\Gamma_2 = 0.1$ MHz, $\omega_n = 0.52$ MHz, $\Omega_0 = 0.15$ MHz, $Q = 1000$

Fig. 3. (a) Detection absorption spectra obtained at different coupling intensities with $\Delta_0 = \omega_n$; (b) the relationship between the splitting width of the two peaks in the absorption spectrum and the coupling strength. The parameters in both figures are $\Gamma_1 = 0.2$ MHz, $\Gamma_2 = 0.1$ MHz, $\omega_n = 0.52$ MHz, $\Omega_0 = 0.15$ MHz, $Q = 1000$.

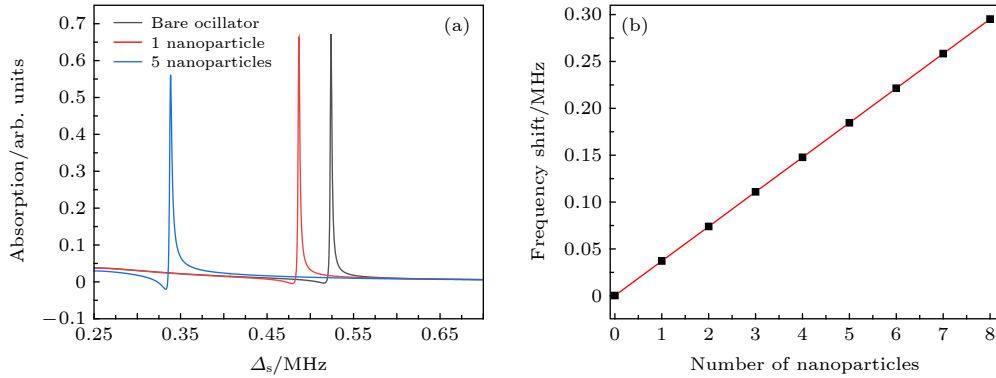


图 4 (a) 振子上外加纳米颗粒时的吸收谱, 图中 $\Gamma_1 = 0.1$ MHz, $\Gamma_2 = 0.05$ MHz, $\Omega_0^2 = 0.01$ (MHz)², $\Delta_0 = 0$, $\omega_n = 0.52$ MHz, $g_0 = 0.5\omega_n$, $Q = 1000$; (b) 外加纳米颗粒个数与振子频移的关系

Fig. 4. (a) Absorption spectra when nanoparticles are added to the oscillator, where $\Gamma_1 = 0.1$ MHz, $\Gamma_2 = 0.05$ MHz, $\Omega_0^2 = 0.01$ (MHz)², $\Delta_0 = 0$, $\omega_n = 0.52$ MHz, $g_0 = 0.5\omega_n$, $Q = 1000$; (b) the relationship between the number of added nanoparticles and the oscillator frequency shift.

质量为 0.1 ng 纳米颗粒为例, 在振子频率 $\omega_n = 0.52$ MHz 时, 外加 1 个和 5 个纳米颗粒的吸收光谱如图 4(a) 所示. 图中黑色曲线是未加纳米颗粒的峰, 当有纳米颗粒附着在振子上时就会增加振子的有效质量, 并减小系统机械振动的频率, 吸收谱的峰值会向左偏移. 例如, 加 1 个纳米颗粒时的频移 $\Delta f = 0.0369$ MHz, 加 5 个纳米颗粒时的频移 $\Delta f = 0.1845$ MHz, 分别对应着图 4(a) 中红色曲线和蓝色曲线. 由 Δm 和 Δf 的关系式可以看出两者成正比, 因此, 可以通过频移得出外加的纳米颗粒个数. 图 4(b) 给出了外加纳米颗粒个数与频移的关系图, 其斜率为质量响应率, 用 R 来表示, $R = \omega_n/2M$, 由此关系式可以看出, 振子的有效质量越小, 振动频率越高, 质量响应率越大. 而本文中超强耦合量子点-机械振子系统的质量响应率可

以达到 $R = 0.369$ Hz/fg. 与一些以碳纳米管和石墨烯等材料的纳米机械振子相比, 该系统不用在低温环境下才能测量, 并且有着较高的质量响应率.

另一方面, 各种噪声源包括本质噪声和外在噪声将会影响该复合系统质量传感性能和灵敏度. 通常来说机械运动的本质热噪声是主要的噪声源, 将会最终影响传感灵敏度, 从文中提出的质量响应率 $R = \omega_n/2M$ 看, 温度影响了机械振子的共振频率进而也就影响着质量响应率, 也就是质量测量的灵敏度. 当传感器件在较低的温度条件下工作, 可以有效减少这个噪声. 此外, 外在的噪声源比如在读出设备的探测噪声也是很显著地. 对于一些复杂的读出设备, 探测系统引起的噪声是主要的噪声源, 噪声会非常大而掩盖掉信号的探测. 而在非线性区域内的质量传感会产生大的共振振幅和较大的输出

信号, 而不会同时放大噪声, 这对抵消探测噪声的影响和提高信噪比是很有益的. 因此, 与线性区域内的质量传感相比, 非线性光学谱可以克服探测噪声并且提高传感的性能.

4 结 论

理论上提出一种复合量子点-纳米机械振子系统的全光学质量测量方案, 介绍了系统中一些相干光学参数的测量方法. 由于激子-声子的耦合强度达到超强耦合标准, 该系统的耦合机制可实现室温下量子点非拆卸读出, 使得该系统可以用来做室温下全光学质量传感, 测量纳克量级物质的质量. 此方案比传统的电学测量方案更加精确和灵敏, 不再受电学热效应的影响, 用双光照射驱动系统与单束光驱动相比, 可以不受频率的限制. 另外, 与其他石墨烯、碳纳米管等材料的振子耦合成的系统相比, 该系统不仅可以在 5 K 的低温下测量相干光学特性, 而且还可以在 300 K (26.85 °C) 的室温下实现质量传感. 由于系统振子频率较低、有效质量不够小, 因此, 测量的质量量级要小一些. 该方案可以用来做一些纳克量级生物分子、同位素等物质的质量测量, 还可以用来研究快慢光、声子诱导透明等其他光学现象.

参考文献

- [1] Li J J, Zhu K D 2013 *Phys. Rep.* **525** 223
- [2] Yeo I, De Assis P L, Gluppe A, Dupont-Ferrier E, Verlot P, Malik N S, Dupuy E, Claudon J, Gérard J M, Auffèves A, Noguees G, Seidelin S, Poizat J P, Arcizet O, Richard M 2014 *Nat. Nanotech.* **9** 106
- [3] Treutlein P 2014 *Nat. Nanotech.* **9** 99
- [4] Arcizet O, Jacques V, Siria A, Poncharal P, Vincent P, Seidelin S 2011 *Nat. Phys.* **7** 879
- [5] Kolkowitz S, Jayich A C B, Unterreithmeier Q P, Bennett S D, Rabl P, Harris J G E, Lukin M D 2012 *Science* **335** 1603
- [6] Unruh W G 1978 *Phys. Rev. D* **18** 1764
- [7] Auffèves A, Richard M 2014 *Phys. Rev. A* **90** 023818
- [8] Chen X, Liu X W, Zhang K Y, Yuan C H, Zhang W P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164211 (in Chinese) [陈雪, 刘晓威, 张可焯, 袁春华, 张卫平 2015 物理学报 **64** 164211]
- [9] Lecocq F, Clark J B, Simmonds R W, Aumentado J, Teufel J D 2015 *Phys. Rev. X* **5** 041037
- [10] Zhong W X, Wang Y P, Cheng G L 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0827001 (in Chinese) [钟文学, 王一平, 程广玲 2015 光学学报 **35** 0827001]
- [11] Ekinci K L, Yang Y T, Roukes M L 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2682
- [12] Li Z Z, Ouyang S H, Lam C H, You J Q 2012 *Phys. Rev. B* **85** 235420
- [13] Liao J Q, Kuang L M 2008 *Eur. Phys. J. B* **63** 79
- [14] Boisen A 2009 *Nat. Nanotech.* **4** 404
- [15] Chen H J, Mi X W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124206 (in Chinese) [陈华俊, 米贤武 2011 物理学报 **60** 124206]
- [16] Li J J, Bin W, Zhu K D 2014 *Chin. Sci. Bull.* **59** 1907 (in Chinese) [李金金, 宾文, 朱卡的 2014 科学通报 **59** 1907]
- [17] Chen H J, Fang X W, Chen C Z, Li Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 194205 (in Chinese) [陈华俊, 方贤文, 陈昌兆, 李洋 2016 物理学报 **65** 194205]
- [18] Xu X, Sun B, Berman P R, Steel D G, Bracker A S, Gammon D, Sham L J 2008 *Nat. Phys.* **4** 692
- [19] Liu J, Zhu K D 2018 *Photon. Res.* **6** 867
- [20] Imoto N, Haus H A, Yamamoto Y 1985 *Phys. Rev. A* **32** 2287
- [21] Pontin A, Bonaldi M, Borrielli A, Marconi L, Marino F, Pandraud G, Prodi G A, Sarro P M, Serra E, Marin F 2018 *Phys. Rev. A* **97** 033833
- [22] Chen H J, Zhu K D 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **31** 1684
- [23] Chen H J, Chen C Z, Li Y, Fang X W, Tang X D 2016 *Sci. Rep.* **6** 36600
- [24] Hanay M S, Kelber S, Naik A K, Chi D, Hentz S, Bullard E C, Colinet E, Duraffourg L, Roukes M L 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 602
- [25] Li J J, Zhu K D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 063116
- [26] He Y 2017 *Nanotechnology* **28** 255203

All-optical mass sensing based on ultra-strong coupling quantum dot-nanomechanical resonator system^{*}

Yang Jian-Yong Chen Hua-Jun[†]*(School of Mechanics and Photoelectric Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)*

(Received 24 April 2019; revised manuscript received 15 October 2019)

Abstract

Nanomechanical oscillators have not only the advantages of extremely small mass and volume, but also high vibration frequency and quality factor, so they are widely used in the field of sensors. In recent years, nanomechanical oscillators comprised of graphene nanoribbons, carbon nanotubes, molybdenum disulfide and other materials have been used to make mass sensors. Great progress has been made in the application of mass sensing, but the measurement environment is limited to ultra-low temperature. Presented in this paper is a hybrid quantum dot-nanomechanical resonator (QD-NR) system which is based on semiconductor chips with quantum dots embedded at the bottom of inverted semiconductor conical nanowires. The system has the advantages of high integration level, full optical interface and low temperature compatibility. In addition, it has a coupling strength, a frequency as large as the vibration frequency of the mechanical oscillator, and a long spin life, which provides the possibility of realizing the quantum unassembled readout of a single spin at room temperature. We investigate the coherent optical properties with the optical pump-probe scheme, and an all-optical mean for determining the resonator frequency and the coupling strength of the QD and NR is presented with the absorption spectrum under different parameter regimes. We set the frequency of the pump light to be equal to the exciton frequency and scan the frequency range of the detection light, and then two sharp peaks will appear in the absorption spectrum of the probe light, and the sharp peak is for the frequency of the mechanical oscillator. Moreover, the coupling strength can be obtained from the linear relationship between the peak splitting width and the coupling strength in the absorption spectrum. Further, we put forward a room temperature mass sensing based on the hybrid QD-NR system, and the frequency shift caused by additional nanoparticles can be directly measured with the absorption spectrum, and then the mass of extra nanoparticles can be determined. Comparing with the previous nanomechanical oscillator, the exciton-phonon coupling strength is very strong in the system and can reach the ultra-strong coupling, which is advantageous for observing the coherent optical properties and reaching high precision and resolution mass sensing. In this system, the mass responsivity can reach. The scheme is expected to be applied to mass measurement of some biomolecules, isotopes and other materials, and also be widely used in other fields at a nanogram level.

Keywords: quantum dots, nanomechanical resonators, mass sensing**PACS:** 63.22.-m, 78.67.Hc, 73.22.-f**DOI:** [10.7498/aps.68.20190607](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190607)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11804004, 11647001) and the Anhui Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. 1708085QA11).

[†] Corresponding author. E-mail: chenphysics@126.com