

腔光力系统中声子的朗道-芝诺-斯塔博格干涉 (特邀)

湛成渝^{1,2}, 龚志诚¹, 毛添华¹, 袁 泉^{1,2}, 李 勇³, 付 号^{1*}

- (1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京计算科学研究中心, 北京 100193)

摘 要: 微纳机械振子被认为是一种发展片上信号处理器件的理想平台, 可以将各种不同的物理场转换为振动声子, 实现基于声子的片上信息处理。其中, 控制声子在不同机械振子间的传输是实现声子信息处理的关键。通过将两个机械振子耦合构造两模机械系统, 目前虽然已经实现了不同杂化模式间声子的相干传输, 但是依然缺乏直接调控两个独立机械振子有效耦合强度的方法。为此, 文中在腔光力系统中开发了基于朗道-芝诺-斯塔博格 (Landau-Zenner-Stückelberg, LZS) 干涉的相干声子操控方法。在利用光学囚禁作用调控两个机械振子振动模式杂化的基础上, 通过对囚禁光进行调制施加参量驱动场, 使得系统周期性地穿过交叉点实现了声子的 LZS 干涉。研究表明: 在满足共振条件下, 利用 LZS 干涉可以实现声子在两个独立机械振子间的相干传递。笔者的研究为实现声子信息在实空间的高效传递提供了一个有效途径。

关键词: 相干声子操控; 朗道-芝诺-斯塔博格干涉; 腔光力系统; 耦合机械振子; 声子信息处理

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210521

Landau-Zenner-Stückelberg interference of phonons in a cavity optomechanical systems (*Invited*)

Shen Chengyu^{1,2}, Gong Zhicheng¹, Mao Tianhua¹, Yuan Quan^{1,2}, Li Yong³, Fu Hao^{1*}

- (1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Beijing Computational Science Research Center, Beijing 100193, China)

Abstract: Micro-nano mechanical resonators are believed to be an ideal platform for developing on-chip signal processing devices, in which various kinds of physical fields can be transduced to mechanical phonons for phonon-based information processing. In such a strategy, control of phonon transferring between different mechanical resonators is essential for phonon-based information processing. By coupling two mechanical resonators for a two-mode mechanical system, although coherent phonon transferring between hybridized mechanical modes has been achieved recently, direct control over the effective coupling between disparate mechanical resonators is still desirable. Therefore, coherent control of phonons through Landau-Zenner-

收稿日期: 2021-05-20; 修订日期: 2021-07-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0304500); 科学挑战计划 (TZ2018003); 国家自然科学基金 (1174024, 12074030, U1930403, U1930402)

作者简介: 湛成渝, 男, 博士生, 主要从事微纳机械振子的测量和操控方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 付号, 男, 副研究员, 博士, 主要从事光力精密传感及其器件方面的研究。

Stückelberg (LZS) interference was developed in an optomechanical system in this paper. The hybridization between two mechanical resonators was mediated using the effect of optical trapping, and a parametric driving field was applied through modulating the optical trap so that the system transversed the avoided-crossing point periodically to realize the LZS interference of phonons. The studies demonstrate that coherent phonon transferring between two disparate mechanical resonators can be achieved through the LZS interference when the on-resonance condition is satisfied. The authors' research provides an efficient scheme for high-efficient transferring of phonon-based information in real space.

Key words: coherent phonon manipulation; Landau-Zenner-Stückelberg interference; cavity optomechanical system; coupled mechanical resonator; phonon-based information processing

0 引言

微纳机械振子被认为是一种构造信号处理器件的理想平台,可以用做一个通用的信息接口将不同类型的物理场转换为振动声子,并通过控制声子在机械振子间的相干传输实现信号的处理^[1-2]。特别是随着腔光力学研究的发展,人们在腔光力系统中已经成功实现了宏观尺度机械振子量子态的制备^[3],使得基于机械系统的声子量子器件成为可能^[4]。通过将不同机械振子耦合,它们的振动可以重新对角化形成新的杂化模式。通过拉比振荡等方式人们已经实现了两个杂化模式间声子的相干操控^[5-8]。尽管如此,如何直接操控两个独立机械振子目前依然缺乏一种有效方法,这使得声子信号的实空间高效传输依然面临极大挑战。

免交叉点通常是两个能级本征态物理性质发生交换的分界点,它与许多重要的物理现象有着密切的联系。1932年,朗道(Landau)和芝诺(Zenner)分别研究了二能级系统在外驱动作用下快速地通过免交叉点时的情况。他们的研究表明在系统通过免交叉点时两个能级间会发生非绝热隧穿,即朗道-芝诺隧穿^[9-10]。当系统在外界周期性驱动场的作用下多次通过免交叉点时,每次隧穿之后系统所获得的动力学位相可以不断积累,并通过干涉使得两个能级上的布居数与驱动时间呈周期性的变化,这一现象被称为朗道-芝诺-斯塔博格(Landau-Zenner-Stückelberg, LZS)干涉^[11-12]。目前,LZS干涉在量子比特的测量和操控等方面已经有了广泛应用^[13-15]。

文中在腔光力系统中开展了声子的 LZS 干涉的实验研究。笔者构造了基于耦合悬臂梁的两模机械系统,并通过对光势阱进行调制施加周期性驱动场,

研究了利用 LZS 干涉实现两个悬臂梁间声子相干传递的方法。

1 可调谐两模系统的构建

笔者实验中使用的单晶硅悬臂梁是在 SOI (Silicon-On-Insulator) 原片上刻蚀得到的。在刻蚀的时候,选择把二氧化硅衬底多刻蚀一些,将悬臂梁的基底能够伸出衬底 20 μm 左右,从而使得它们可以通过基底层上的应力实现耦合。所使用悬臂梁的尺寸为长 220 μm、宽 10 μm、厚 220 nm,它们的间距为 10 μm。由于加工误差和材料的非均匀性等因素的影响,两个悬臂梁弯曲振动基模 $x_j(j=1,2)$ 不简并,它们的频率分别为 $\omega_1/2\pi=6,624.2$ Hz 和 $\omega_2/2\pi=7,055.9$ Hz。在室温真空条件下它们的振动耗散率几乎一样($\gamma_j/2\pi=1.85$ Hz)。

为了测量和控制声子在两个悬臂梁之间的传输,耦合悬臂梁中的一个(悬臂梁 1)被插入到由两个光纤形成的法布里珀罗腔中构成如图 1(a) 所示的腔光力系统。如图 1(b) 所示,由于两个悬臂梁之间存在固有的结构耦合,它们会杂化形成两个新的模式,此时每个悬臂梁的运动都是这两个杂化模式的叠加。这使得测量其中任何一个悬臂梁的运动都可以在频域上看到两个共振峰。

通过调节悬臂梁 1 在光腔中的位置,可以利用色散光力耦合作用实现对悬臂梁 1 的光学囚禁,从而使其共振频率与囚禁光功率 P 相关: $\omega_1^2(P) = \omega_1^2(0) + gP$, 其中 $g \approx 1.82 \times 10^7 \text{ rad}^2 / (\text{s}^2 \cdot \mu\text{W})$ 表示光学囚禁强度。悬臂梁 2 由于不与光场直接作用,所以其本征频率 ω_2 保持不变。当连续调节囚禁光强度时,可以从悬臂梁的热振动谱上清晰地看到两个杂化模式的免交叉

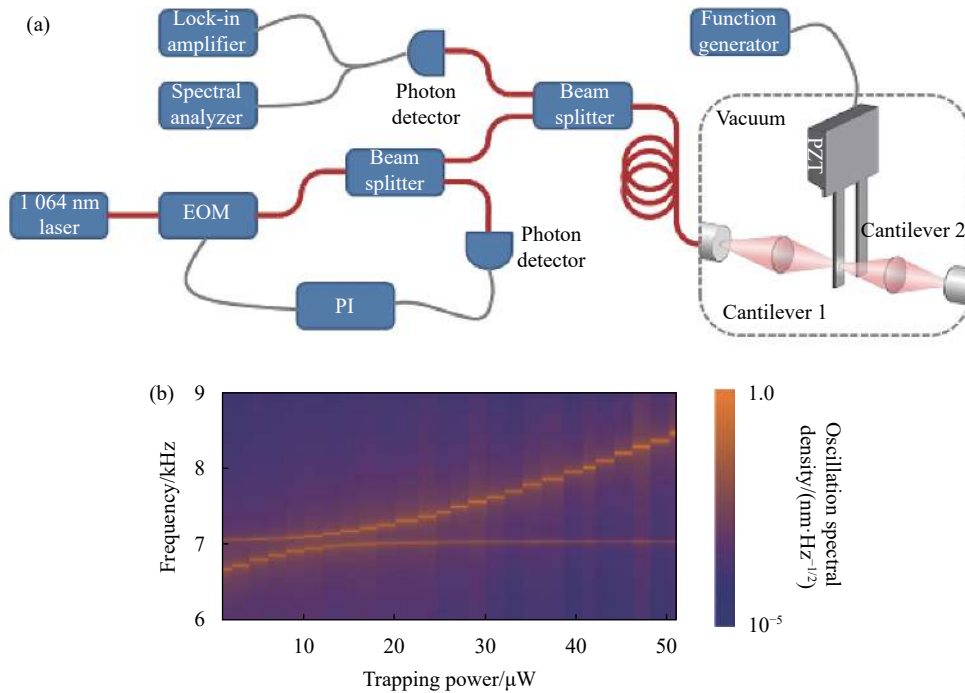


图 1 (a) 实验装置示意图 (为了对单个悬臂梁进行测量和控制, 光束半径被微透镜聚焦到了约 3 μm); (b) 不同囚禁功率下耦合悬臂梁的热振动功率密度谱

Fig.1 (a) Schematic diagram of experimental setup(In order to detect and control only one cantilever, the beam radius is focused to 3 μm by two micro-lenses); (b) Thermal oscillation spectral density of the coupled cantilevers at various trapping powers

现象。在囚禁光功率为 12.8 μW 时, 两个杂化模式间的频率差最小, 此时两个杂化模式的频率差即为悬臂梁的耦合强度 $\Delta_0/2\pi = 159$ Hz。

2 LZS 干涉

为了实现声子在两个悬臂梁之间的相干传输, 囚禁光的功率被周期性调制 $P(t) = P_0 + P_d \cos(\omega_d t)$, 从而使得悬臂梁 1 处于一个周期性振荡的光势阱中。此时, 悬臂梁的位移可以写为 $x_j(t) \approx \text{Re}[a_j(t)e^{-i\omega_j t}]$, 其中 $a_j(t)$ 代表悬臂梁 j 的振动幅度。在悬臂梁振幅变化比较缓慢的情况下, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} i\frac{d}{dt} + \varepsilon(t) + i\frac{\gamma_1}{2} & \frac{\omega_2}{\omega_1(P_0)} \frac{\Delta_0}{2} \\ \frac{\Delta_0}{2} & i\frac{d}{dt} + i\frac{\gamma_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中: 驱动场 $\varepsilon(t) = A_d \sin(\omega_d t)$ 的幅度为 $A_d = gP_d/2\omega_1(P_0)$ 。作变换 $a_1(t) = \frac{\omega_2}{\omega_1(P_0)} b_1(t)e^{-i\int \varepsilon(t) dt}$ 和 $a_2(t) = b_2(t)$, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} -i\frac{d}{dt} - i\frac{\gamma_1}{2} & \frac{\Delta_0}{2} e^{i\int \varepsilon_0 + A_d \sin(\omega_d t) dt} \\ \frac{\Delta_0}{2} e^{-i\int \varepsilon_0 + A_d \sin(\omega_d t) dt} & -i\frac{d}{dt} - i\frac{\gamma_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1(t) \\ b_2(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

其中, 驱动偏置 $\varepsilon_0 = \omega_1(P_0) - \omega_2$ 。这表明在驱动场作用下, 两个悬臂梁间的有效耦合强度变为: $\Delta_{eff} = \Delta_0 \sum_n (\pm 1)^n J_n \left(\frac{A_d}{\omega_d} \right) \exp[\pm i(\varepsilon_0 - n\omega_d)t]$, 其中 J_n 表示 n 阶第一类贝塞尔函数^[16-17]。在 $\varepsilon_0 - n\omega_d = 0$ (n 为整数) 时, 两个悬臂梁可以实现共振的耦合。当驱动频率非常高时 ($\omega_d \gg \Delta_0$), 忽略非共振项的作用, 可以得到悬臂梁的有效耦合强度 $\Delta_{eff} \approx \Delta_0 |J_n(A_d/\omega_d)|$ 。

3 实验结果

通过控制两个悬臂梁之间的有效耦合, 可以实现声子在两个独立振子之间的相干传递。虽然在系统远离免交叉点的情况下 ($\varepsilon_0 \gg \Delta_0$) 由于两个悬臂梁近似解耦, 利用拉比振荡等物理机制可以等效地实现两个悬臂梁的相干操控, 但是当系统处于免交叉点附近时 ($\varepsilon_0 \sim \Delta_0$), 由于悬臂梁振动的杂化利用这种方法难以实现声子在两个独立悬臂梁之间的高效传输。为

此,在囚禁光功率 $P_0 = 19.6 \mu\text{W}$ 时,开展了利用 LZS 干涉实现两个独立悬臂梁间声子相干传输方法的研究。此时,两个悬臂梁之间由于存在较强的耦合,每个杂化模式都是两个悬臂梁振动的叠加。实验上,首先将囚禁光功率增加到 $P_m = 45 \mu\text{W}$,并利用压电陶瓷激励低频杂化模,使其振动幅度远大于其热振幅。在系统处于远离交叉点时,由于悬臂梁之间是近似解耦的,此时几乎所有的能量都被制备到悬臂梁 2 上。在完成初态制备之后($t = 0$),将囚禁光功率快速改变至 $P_0 = 19.6 \mu\text{W}$,此时对应的系统偏置 $\varepsilon_0/2\pi \approx 200 \text{ Hz}$ 。

为了实现两个悬臂梁的共振耦合,频率 $\omega_d = \varepsilon_0$ 的周期性驱动被施加以实现基于一阶 LZS 干涉($n = 1$ 的过程)的相干声子操控。为了测量驱动场作用 τ 时间之后系统的末态,在驱动结束之后囚禁光功率被再次快速改变至 P_m ,同时对系统的振动进行测量。实验测量得到的不同驱动作用时间下悬臂梁 2 的振动幅度如图 2(a) 所示。随着驱动场作用时间的增加,悬臂梁的振动幅度会出现周期性振荡,实验测量得到的能量 $|a_j|^2$ 传输效率达到了 90% 以上。悬臂梁的耦合强度可以通过调节驱动场的幅度 A_d 来控制。实验中,在保持驱动频率 $\omega_d/2\pi = 200 \text{ Hz}$ 不变的条件下将囚禁光的调制强度 P_d 从 $7 \mu\text{W}$ 逐渐增加到了 $19.4 \mu\text{W}$,从而使得驱动场的幅度 A_d 由 $2\pi \times 223 \text{ Hz}$ 增大到了 $2\pi \times 614 \text{ Hz}$ 。如图 2(b) 所示,虽然不同驱动幅度下声子依然可以在悬臂梁之间相干地传递,但是传递的频率发生了明显变化。实验测量得到的声子传输速率与理论上计算得到的有效耦合强度 Δ_{eff} 能够较好的吻合。在驱动幅度 $A_d/2\pi \approx 309 \text{ Hz}$ 时悬臂梁间能量传递速率最大,达到了约 100.7 Hz。

类似地,相干声子操控可以通过高阶 LZS 干涉来实现。通过增大囚禁光功率 P_0 至 $25.4 \mu\text{W}$,将系统的偏置增到了 $\varepsilon_0/2\pi \approx 400 \text{ Hz}$ 。在频率为 $\omega_d/2\pi = 200 \text{ Hz}$ 的驱动场作用下,两个悬臂梁之间可以实现基于二阶 LZS 过程($n = 2$ 的 LZS 干涉)的共振耦合。如图 3 所示,通过对囚禁光功率施加幅度为 $P_d = 19.8 \mu\text{W}$ 的调制,测量了驱动幅度 $A_d/2\pi = 612 \text{ Hz}$ 时两个悬臂梁的振动能量与驱动场作用时间之间的关系。与一阶过程不同,在二阶 LZS 干涉中观察到了明显的退相(dephasing),这表现为声子振荡的幅度随着操控时间的增大而不断减小。实验上测量到的退相速率约为

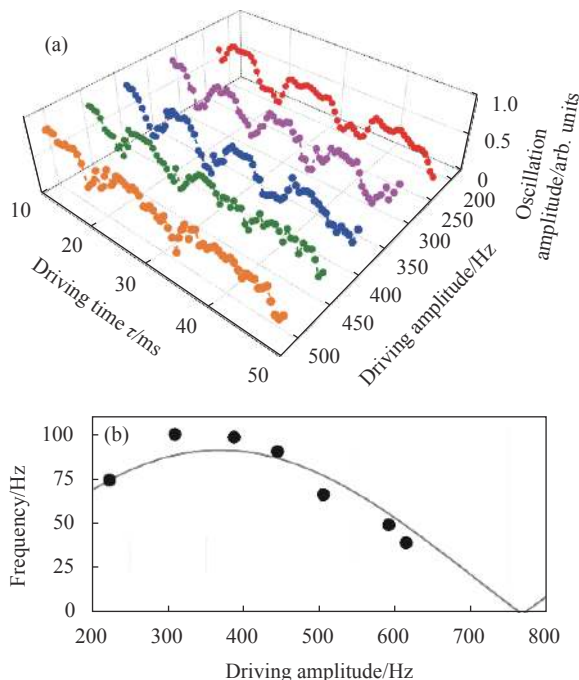


图 2 (a) 一阶 LZS 干涉导致的声子振荡; (b) 声子振荡频率与驱动幅度的关系 (实验测量结果 (黑点) 与理论计算的 Δ_{eff} (灰色实线) 相符)

Fig.2 (a) Phonon oscillation caused by the first-order LZS interference; (b) Relation between the driving amplitude and frequency of phonon oscillation (Experimental measurements (black dots) agree well with theoretical results calculated from Δ_{eff} (gray line))

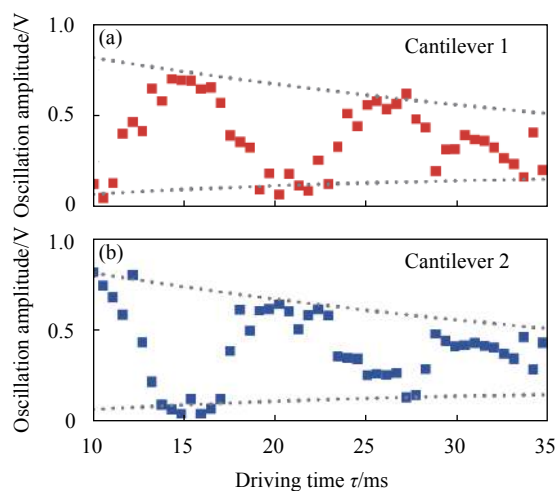


图 3 二阶 LZS 干涉导致的声子振荡 (灰色点线表示声子振荡的幅度)
Fig.3 Phonon oscillation caused by the second-order LZS interference (Gray dotted line represents the amplitude of phonon oscillation)

2.8 Hz, 略大于悬臂梁的振动耗散率 γ_m , 表明二阶 LZS 干涉中操控的相干性主要受振动退相的制约。之所以在二阶 LZS 干涉存在明显的退相,这主要是由

于低阶的非共振耦合项在驱动频率较低时并不能完全忽略。当囚禁光强波动等因素导致偏置 ϵ_0 发生涨落时,这种低阶非共振耦合项的存在使得声子振荡的相位产生显著变化,从而引起退相。

当系统恰好处于免交叉点时由于在任意驱动频率下均可以悬臂梁的共振耦合,这使得可以通过提高驱动场的频率避免非共振耦合项的影响。为此,调节囚禁光功率至 $P_0 = 12.8 \mu\text{W}$,使系统处于免交叉点处($\epsilon_0 = 0$),并对囚禁光进行强度 $P_d = 12.04 \mu\text{W}$ 的调制,以施加幅度 $A_d/2\pi = 420 \text{ Hz}$ 恒定的驱动场。在不同驱动频率下测量到的两个悬臂梁的振动幅度如图 4(a)和 (b) 所示。利用零阶 LZS 干涉 ($n = 0$ 的过程),在两个悬臂梁间实现了效率为 95% 的能量传递。两个悬臂梁之间能量传递速率可以通过驱动频率 ω_d 调控。在驱动频率 $\omega_d/2\pi \approx 167 \text{ Hz}$ 时,悬臂梁间的耦合被有效的关断,使得能量无法在悬臂梁间共振地传递。此时,实验上测量得到的悬臂梁振幅的周期性振荡主要由非共振的高阶耦合项引起的。随着驱动频率的提高,悬臂梁间的耦合被逐渐打开,同时非共振的高阶耦合项的影响越来越小,这与通过对公式 (2) 数值计算得到的结果一致 (如图 4(c) 和 (d) 所示)。

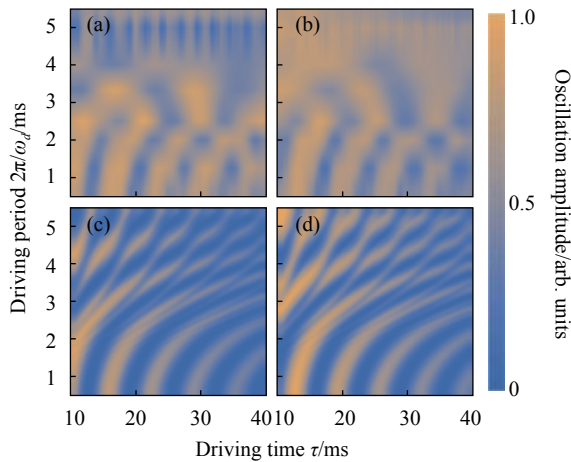


图 4 基于零阶 LZS 干涉的声子振荡。共振条件下测量得到的 (a) 悬臂梁 1 和 (b) 悬臂梁 2 的振幅与数值计算得到的 (c) 悬臂梁 1 和 (d) 悬臂梁 2 的振幅

Fig.4 Phonon oscillation based on the zero-order LZS interference. The experimentally measured amplitudes of (a) cantilever 1 and (b) cantilever 2, and the numerical calculated amplitudes of (c) cantilever 1 and (d) cantilever 2 at the resonant condition

4 结 论

文中在腔光力系统中利用 LZS 干涉实现了声子的相干操控。在基于耦合机械振子的腔光力系统,通过对光势阱进行调制施加周期性驱动场,笔者利用 LZS 干涉展示了声子在两个空间上独立的机械振子间的相干传递,并实现了声子传输速率的共振调谐。与传统的拉比振荡等方法相比,利用 LZS 干涉可以直接对两个空间上独立机械振子而非杂化振动模式进行操控,从而使得在任意驱动偏置下都可以实现声子信息在实空间的高效相干传输。虽然文中的研究是在腔光力系统中实现的,但是这种操控方法同样是可以推广到其他类型的耦合振子系统中,这为片上集成声子信号处理器件中不同接口间信息的高效交换提供了一种有效途径。

参考文献:

- [1] Bagci T, Simonsen A, Schmid S, et al. Optical detection of radio waves through a nanomechanical transducer [J]. *Nature*, 2014, 507(7490): 81-85.
- [2] Palomaki T A, Harlow J W, Teufel J D, et al. Coherent state transfer between itinerant microwave fields and a mechanical oscillator [J]. *Nature*, 2013, 495(7440): 210-214.
- [3] Chan J, Alegre T P, Safavi-Naeini A H, et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 89-92.
- [4] O'Connell A D, Hofheinz M, Ansmann M, et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator [J]. *Nature*, 2010, 464(7289): 697-703.
- [5] Okamoto H, Gourgout A, Chang C Y, et al. Coherent phonon manipulation in coupled mechanical resonators [J]. *Nature Physics*, 2013, 9(8): 480-484.
- [6] Zhu D, Wang X H, Kong W C, et al. Coherent phonon rabi oscillations with a high-frequency carbon nanotube phonon cavity [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(2): 915-921.
- [7] Tian T, Lin S, Zhang L, et al. Perfect coherent transfer in an on-chip reconfigurable nanoelectromechanical network [J]. *Phys Rev B*, 2020, 101(17): 174303.
- [8] Zhang Z Z, Song X X, Luo G, et al. Coherent phonon dynamics in spatially separated graphene mechanical resonators [J]. *PNAS*, 2020, 117(11): 5582.
- [9] Landau L D. A theory of energy transfer on collisions [J]. *Phys Z Sowjet*, 1932, 1(88): 52-59.

- [10] Zener C. Non-adiabatic crossing of energy levels [C]// Proceedings of the Royal Society of London, 1932, 137(833): 696-702.
- [11] Shevchenko S N, Ashhab S, Nori F. Landau-Zener-Stückelberg interferometry [J]. *Physics Reports*, 2010, 492(1): 1-30.
- [12] Ashhab S, Johansson J R, Zagoskin A M, et al. Two-level systems driven by large-amplitude fields [J]. *Physical Review A*, 2007, 75(6): 063414.
- [13] Yang Z X, Zhang Y M, Zhou Y X, et al. Phase-sensitive Landau-Zener-Stückelberg interference in superconducting quantum circuit [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(2): 024212.
- [14] Kervinen M, Ramirez-Munoz J E, Valimaa A, et al. Landau-Zener-Stückelberg interference in a multimode electromechanical system in the quantum regime [J]. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(24): 240401.
- [15] Oliver W D, Yu Y, Lee J, et al. Mach-Zehnder interferometry in a strongly driven superconducting qubit [J]. *Science*, 2005, 310(5754): 1653-1657.
- [16] Fu H, Gong Z C, Yang L P, et al. Coherent optomechanical switch for motion transduction based on dynamically localized mechanical modes [J]. *Phys Rev Appl*, 2018, 9(5): 054024.
- [17] Zhou L, Yang S, Liu Y X, et al. Quantum Zeno switch for single-photon coherent transport [J]. *Phys Rev A*, 2009, 80(6): 062109.