

纳尺度超材料研究进展^{*}

井亚彬 刘汝盟 王立峰[†]

(南京航空航天大学 航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要 随着微纳制备技术的发展,纳尺度超材料逐渐成为研究热点. 纳尺度超材料在高频弹性波调控和振动噪声抑制等方面有着其独特优势. 由于其服役环境复杂,纳尺度超材料的振动常和热、光和电等因素耦合. 其研究向着更小尺寸,更高频率和多场耦合发展. 本文介绍了纳尺度超材料在振动抑制等方面的实验和理论方面取得的进展,同时简要阐述了纳尺度超材料在热管理和多场耦合方面的研究成果. 进一步展望了纳尺度超材料未来的发展方向.

关键词 纳尺度超材料, 声子, 振动, 带隙特性, 热输运, 多场耦合

中图分类号:O328

文献标志码:A

Research Progress on Nanoscale Metamaterials^{*}

Jing Yabin Liu Rumeng Wang Lifeng[†]

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract With the rapid development of micro and nano fabrication technology, nanoscale metamaterials have gradually become a hot research field. Nanoscale metamaterials have their unique advantages in the regulation of high frequency elastic wave and the suppression of vibration and noise. Due to the complexity of their service environment, the vibration of nanoscale metamaterials is often coupled with thermal, optical and electrical factors. Its research is developing towards smaller sizes, higher frequencies and multi-field coupling. In this paper, the experimental and theoretical progress of nanoscale metamaterials in vibration suppression is reviewed. Meanwhile, the research achievements of nanoscale metamaterials in thermal management and multi-field coupling are briefly reviewed. The future development prospect and direction of nanoscale metamaterials are prospected.

Key words nanoscale metamaterials, phonon, vibration, bandgap characteristic, thermal transport, multi-field coupling

引言

NEMS 体积小、质量轻、功能强、性能优越,在通信,航空航天,生物医学,机械电子等领域有着广

泛的应用前景. 近年来,NEMS 器件变得更加智能化,集成化,多功能化和小型化. 其厚度最薄可以达到单原子的厚度^[1],当结构小至纳米尺寸时,会涌现出很多新的力、电、光和热等问题. 纳尺度下,结

2024-06-30 收到第 1 稿,2024-07-18 收到修改稿.

^{*} 国家杰出青年科学基金(11925205),国家自然科学基金(12072148,12372092,51921003,U2341230),National Science Fund for Distinguished Young Scholars(11925205),Natural Science Foundation of China (12072148,12372092,51921003,U2341230).

[†] 通信作者 E-mail:walfe@nuaa.edu.cn

结构的特征频率通常高达吉赫兹(GHz)甚至太赫兹(THz),此时极小的振动对于器件的影响也变得不可忽视^[2-9].研究表明,纳尺度超材料在高频振动的抑制以及弹性波的调控方面发挥着显著作用^[10-16].

声子是弹性结构中振动模式的量子化,是声、热和机械振动的主要载体.其频率范围从次声波(低于 20Hz)、超声波(Ultrasound, $10^4 \sim 10^8$ Hz)、高超声波(Hypersound, $10^8 \sim 10^{11}$ Hz)到热振动(10^{11} Hz)^[17].通常情况下,随着声子频率的升高,对应的结构尺寸随之减小.宏观尺度下的超材料在结构的减振降噪^[18-24]方面发挥着巨大作用.超材料通常在毫米、厘米甚至更大的尺度上制作图案,可以采用 3D 打印,甚至手工组装.在无线电和微波领域内,因为波长较长,超材料只需要在数百微米或更大的尺度上制造即可.通常可以使用标准印刷电路板(PCB)工艺和材料或其他相对便宜的工艺制作.然而,对于 GHz 和 THz 频率声子的调控,则需要超材料的特征尺寸小至微纳尺寸,对于制备技术的要求较高.纳尺度下的超材料通常可以通过“自上而下”或者“自下而上”的纳米制备技术得到.自上而下的方法主要通过电子束蚀刻等方法在一个大样本上获得小尺度的特征结构;而自下而上的方法从分子或原子水平开始,将模块组装成更大的实体.随着微纳制备和实验技术的发展,纳尺度超材料的研究也取得了巨大进展.研究纳尺度超材料对于超长寿命和超高灵敏度传感器、谐振器、晶体管等 NEMS 器件具有重要意义.

本文对纳尺度超材料在带隙特性,热管理以及多场耦合方面的研究做出了简要介绍.重点关注纳尺度超材料的声子带隙和传输特性,介绍了其在减

振降噪和弹性波调控方面的进展.最后,对纳尺度超材料的研究现状进行总结,并展望其发展前景.

1 纳尺度超材料带隙特性

波动作为物质动态行为的一种普遍现象,物质粒子相互作用的远距离传播,局部能量的长程转移几乎都依赖于波动行为.结构的波动特性取决于介质的物理属性,常见的声波和弹性波的传播特性就取决于媒介的模量和质量密度^[25].因此可以通过改变介质的物理属性从而实现波的调控功能.构成超材料的人造“原子”或“分子”的结构单元可以在形状和大小上进行定制,晶格常数和原子间相互作用可以调节,也可以设计缺陷并放置在所需的位置.通过设计单胞的结构或几何形状,可以获得天然材料所不具备的优越性能和波的调控能力.由于超材料的周期结构与波相互作用,只有某些频率范围内的波可以在结构中顺利传播,而其他频率范围内的波无法在其中持续传播,也即为带隙.

宏观下带隙产生的机理包括 Bragg 散射机理^[26,27]和局域共振机理^[28,29].前者强调周期结构对于波的影响,产生的带隙最低频率范围和晶格常数有关,晶格尺寸至少要与弹性波的半波长大致相当,因此带隙频率范围受到结构尺寸制约^[30].而想要实现太赫兹范围的波调控,则需要纳米级别的特征尺寸.后者强调单个原胞的运动模式,通过振子在远低于晶格尺寸波长对应的频率范围产生共振而阻挡波的正常传播,从而能实现小尺寸结构的低频带隙^[28].带隙特性是声波/弹性波在超材料中传播的标志性质,其常见的表现形式包括能带结构和传输特性.声子作为振动和热的主要载体,声子带

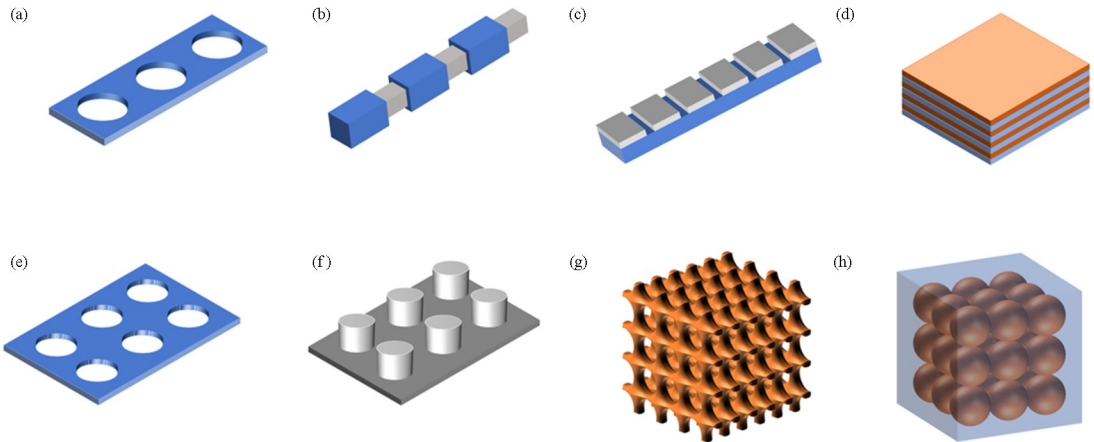


图 1 纳尺度超材料的维度类型:(a)~(d) 一维;(e)、(f) 二维;(g)、(h) 三维

Fig. 1 Dimensional types of nanoscale metamaterials: (a)~(d) One-dimensional; (e)、(f) Two-dimensional; (g)、(h) Three-dimensional

隙的研究对于 NEMS 的减振降噪有着重大意义. 纳尺度超材料简单地按照维度可划分为: (1) 一维, 图 1(a)~(d) 所示的多孔结构; 材料或尺寸周期变化的纳米板、梁和管等; 沟槽型; 多层结构等. (2) 二维, 图 1(e)、图 1(f) 所示的周期多孔板和柱一基结构等. (3) 三维, 图 1(g)、图 1(h) 所示多孔体和自组装纳米胶体等. 本节将从纳尺度超材料的不同维度来介绍在声子带隙及传输特性方面的研究.

1.1 一维纳尺度超材料

1.1.1 纳尺度超材料梁

Li 等^[31] 对纳尺度超材料梁进行了理论和数值研究. 有限元结果表明, 分支纳米柱的局域共振与纳米梁的体声子模态之间的杂化可以改变声子频散, 并大大降低群速度. 有限元模拟得到的声子频散曲线在波长远大于超材料的元胞尺寸的低频范围, 除了平带的存在, 与分子动力学(MD)模拟得到

的频散曲线吻合较好, 如图 2(a) 所示. 然而, 随着尺寸的缩小, 尺寸效应对结构的力学性质^[32-34] 有着较大的影响, 对于弹性波带隙特性^[35-37] 同样如此. Zhou 等^[37] 采用谱元法和数值方法, 研究了表面效应对纳米声子晶体梁的能带结构的影响. 有限元模拟结果表明正的表面杨氏模量和残余应力能够提高带隙的频率, 但是带隙范围变得更窄. 尺寸越小, 带隙对于尺寸的变化越敏感; 而当尺寸足够大时, 带隙不会随着尺寸的改变而变化. Qian^[36] 将平面波展开法应用到具有表面效应的压电声子晶体纳米梁的能带结构计算中. 结果表明随着表面残余应力和材料本征长度的增加, 带隙的起始频率和宽度都随之增大. 含周期空腔的纳米梁通过射频光谱测量和有限元模拟可知结构在 GHz 频率范围拥有完全的声子带隙^[38], 带隙的存在最大化地降低了声泄漏, 从而延长了 NEMS 系统的寿命. 此类典型的纳尺度超材料梁常用于光机耦合^[38-40] 系统.

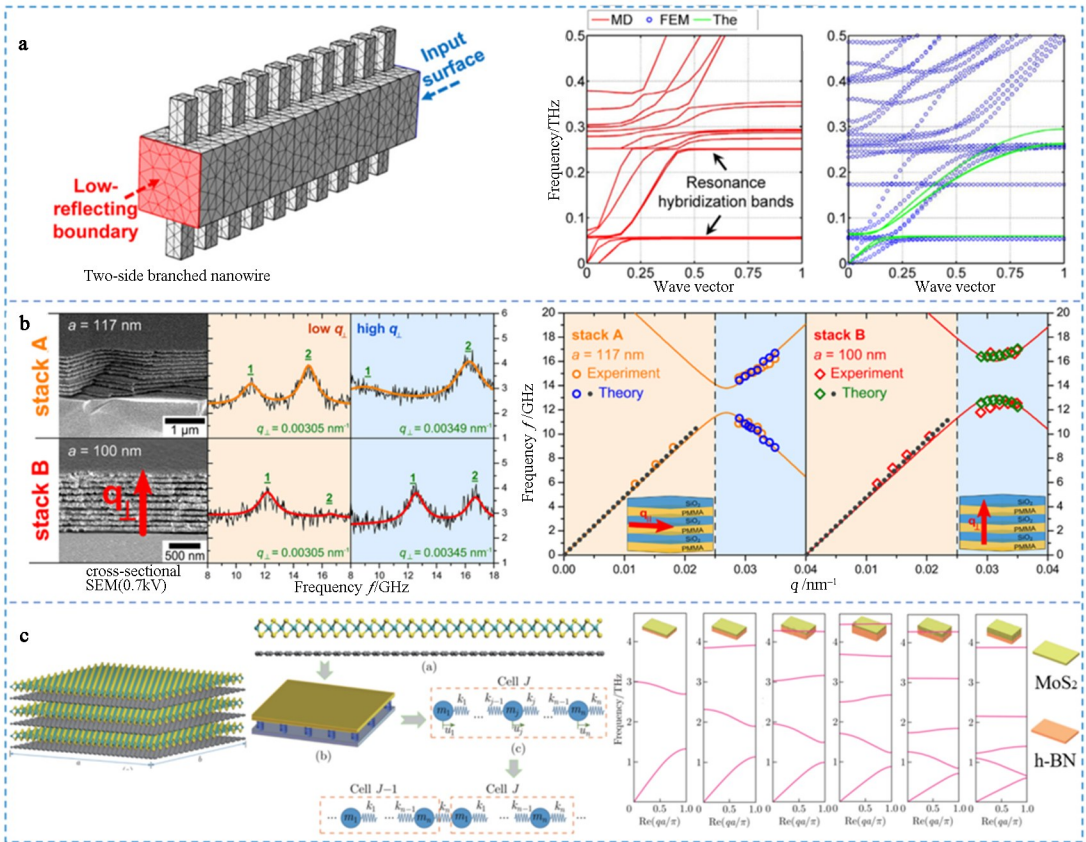


图 2 典型一维超材料结构及频散关系: (a) 一维纳米超材料有限元模型, 有限元和分子动力学模拟得到的声子频散曲线^[31]; (b) 多层 PMMA 和 SiO₂ 周期堆叠的一维超材料结构(左), 理论计算和 BLS 测得超材料的频散曲线(右)^[43]; (c) 多层范德华超材料的质量-弹簧模型(左)以及由质量-弹簧模型得到的 h-BN/MoS₂ 超材料的频散曲线(右)^[49]

Fig.2 Typical structures and dispersion relations of one-dimensional metamaterials: (a) The finite element model of one-dimensional nano-beam metamaterial, phonon dispersion curve obtained by finite element and molecular dynamics simulation^[31]; (b) One-dimensional metamaterial structure with multilayered PMMA and SiO₂ periodically stacked (left), dispersion curve obtained by theoretical calculation and BLS measurement(right)^[43]; (c) Mass-spring model of multilayered h-BN/MoS₂ van der Waals metamaterials (left) and dispersion curves of the metamaterials derived from mass-spring model (right)^[49]

1.1.2 多层超材料

与超材料梁结构类似,多层超材料同样是材料类型或者尺寸周期变化的一维结构.然而,多层超材料的厚度远小于其在面内两个方向的尺寸.当研究多层超材料中波的传播特性时,大多关注的是波在垂直于面内的纵向的传播.

Ramprasad 等^[41]采用第一性原理模拟得到了厚度为 5 Å 的 HfO_2 和 ZrO_2 周期交替堆叠的异质结构的声学带隙,并与连续介质理论中解声波方程得到的结果进行比较,结果表明连续介质理论在描述小尺寸有序介质中波传播的局限性.当带隙频率在太赫兹范围时,采用第一性或半经验方法的显式原子处理可能是必要的. Chen 和 Wang^[42]采用基于非局部弹性连续介质理论的传递矩阵法计算了纳尺度层状超材料的能带结构,由于非局部弹性本构关系中考虑了界面/表面效应,此方法给出的结果与 Ramprasad 等^[41]采用第一性原理得出的结果较为吻合,因此有望代替第一性原理或半经验方法描述纳尺度下多层超材料的波动行为.

Gomopoulos 等^[43]首次实验测量了超高频范围内的由二氧化硅和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)纳米层交替堆叠的多层系统中的声子带隙.利用布里渊光谱测量(Brillouin light spectroscopic measurement, BLS)方法,测得了声子沿周期堆叠方向传播的频散关系.同时采用有限元方法研究了不同的模式以及孔隙率和界面对声子性质的影响,结果与实验非常吻合.通过控制单个纳米层的厚度、周期、顺序以及它们的弹性阻抗常数,可调整和优化多层结构的声学 and 力学性能. BLS 作为一种常见的实验技术常被用来得到纳尺度超材料的声子频散关系. Schneider 等^[44]通过 BLS 和理论计算,研究了厚度为 100 nm 的多孔二氧化硅和 PMMA 交替周期性堆叠的多层超材料的声子频散关系.结果表明这种结构展现出由纵向声速、密度和间距比决定的宽频稳定的 GHz 范围的弹性波带隙.并且利用弹性波传播的矢量特性,在斜入射时实现了带隙宽度的调整,如图 2(b)所示.多层超材料的带隙基本上属于 Bragg 散射机理,其带隙对于材料和周期性比较依赖,但是可以利用这种依赖性来调控带隙的位置和宽度.实验研究^[45]表明在多层超材料的不同位置引入缺陷层也能够调控带隙的位置.

多层范德华异质结构,由石墨烯、六方氮化硼、过渡金属硫化物、MXene 等二维层状材料通过层间范德华力结合在一起,并且表面不存在悬挂键,整体结构仍很薄.这种结构不仅拥有传统二维材料优异的光、电、热和力学性能,并且可以像积木一样按照不同的顺序、扭转角度、种类堆叠成不同层数的结构,从而自由调控其光、力和电性能. Lu 等^[46,47]采用弹性膜模型研究了最外层受拉的多层石墨烯模型,发现该结构在太赫兹范围内存在带隙.最外层的应力致使不同层间的石墨烯出现了晶格不匹配,不同层间的范德华力和质量不再一致,进而使得结构产生了带隙.带隙的数量级和宽度分别由相邻层间的范德华相互作用系数和内层数决定.通过改变材料种类、扭转角度和机械应变等是实现范德华异质结层间相互作用的最有效方式^[48].多层范德华异质结的层间相互作用力主要是范德华力. Jing 等^[49]采用分子动力学方法研究了多层石墨烯/二硫化钼范德华超材料的波动特性,该结构存在着 THz 范围的弹性波带隙.并且基于一维质量-弹簧模型建立了描述多层范德华超材料中弹性波带隙特性的方法,如图 2(c)所示,该方法得到的低频带隙与分子动力学结果吻合很好.带隙频率范围会随着二维材料种类和单胞层数的变化而改变.石墨烯与六方氮化硼的组合带隙频率范围较窄,而六方氮化硼和二硫化钼或者石墨烯和二硫化钼的组合带隙范围很宽.垂直方向堆叠的超材料不仅拥有单一材料不具备的性能,同时能够提高 NEMS 器件的集成密度.

1.2 二维纳尺度超材料

1.2.1 面内多孔超材料

二维纳尺度多孔超材料通常是基于膜基底,利用电子束光刻(Electron Beam Lithography)刻蚀出周期图案而成.其制备方式较为简便. Gorishnyy 等^[50]利用干涉光刻技术制造了晶格常数为 1360 nm 的超高频晶体,并通过 BLS 测量了其能带结构.这项研究为超高频超材料的实验研究铺平了道路. Maccabe 等^[51]采用厚度为 220 nm 的声子晶体屏蔽层将纳米光机械晶体梁与周围的芯片衬底连接起来,从而大大抑制了声辐射[如图 3(a)],增加了声子寿命.此外,他们指出,通过在十字形状的

直角处引入内外圆角, 可以增加声子带隙的宽度. Florez 等^[14]利用 BLS 方法测得室温下晶格常数为 330nm 的三叶草结构的硅膜存在着宽为 5.3GHz 的振动带隙. 带隙频率范围内, 任何入射角下都未测量到弹性波的存在. 通过结构参数的微调, 实现了带隙在 4GHz~11.5GHz 范围的可调性. 并且制备了一种对称的波导结构, 实验测得了 5.7GHz 和 7.1GHz 频率下的波导模. Kirchhof 等^[52,53]采用有限元和实验方法研究了悬浮单层蜂巢晶格石墨烯在应变作用下的带隙变化. 结果表明双轴拉伸(σ_{xx}

$=\sigma_{yy}$)作用下, 结构存在着面外振动带隙, 在单轴拉伸($\sigma_{xx}/\sigma_{yy} \neq 1$)作用下, 带隙范围发生变化, 最终消失, 如图 3(b)所示. Jing 和 Wang^[15]采用分子动力学和有限元方法研究了晶格常数为 8nm 的含周期十字孔的单层六方氮化硼超材料中弹性波的传输特性, 结果表明该超材料存在着 THz 频率范围的面内纵波带隙, 并且分子动力学结果与有限元结果存在着差异, 分子模型中孔洞以及边界上原子未能形成稳定的六圆环结构, 致使结构发生变形, 从而造成两种方法带隙频率范围的差异.

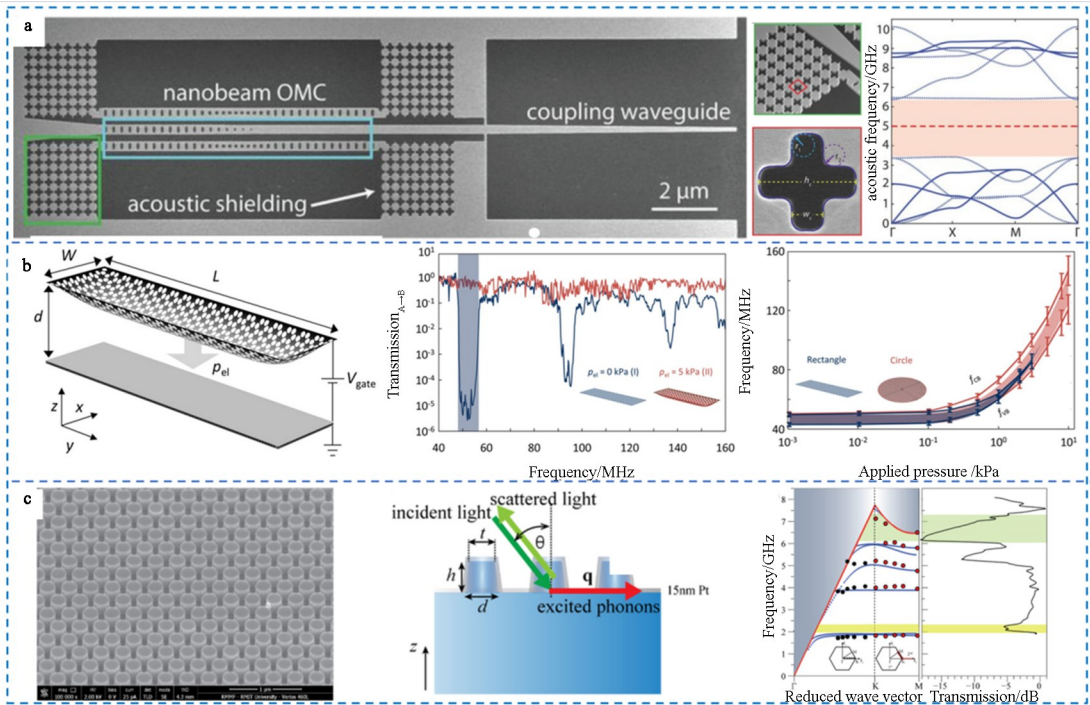


图 3 典型二维超材料结构: (a) 由周期声学屏障连接的纳米光机械晶体梁的扫描电镜图以及有限元模拟得到的声学屏障中单个原胞的能带结构^[51]; (b) 静电压力作用下含周期孔的单层悬浮石墨烯超材料的模型(左), 不同应力下矩形器件的传输曲线(中)、矩形和圆形器件的带隙随着应力的变化曲线(右)^[53]; (c) 柱-基高超声速超材料的模型和 BLS 测得 GHz 范围的声子带隙^[54]

Fig. 3 Typical structures of two-dimensional metamaterials: (a) Scanning electron microscope image of nanobeam optomechanical crystal device connected by periodic acoustic shielding and the band structure of the unit cell in the acoustic shielding obtained by finite element simulation^[51]; (b) Model of the single-layer suspended graphene metamaterial with periodic holes under electrostatic pressure (left), transmission curve of a rectangular device under different applied stresses (middle), and bandgap curve of the rectangular and circular device with stress (right)^[53]; (c) The model of pillar-substrate metamaterials, and the phonon bandgap in the GHz range measured by BLS^[54]

1.2.2 柱-基超材料

Yudistira 等^[54]实验研究了首个纳米尺寸的柱-基超高频超材料, 该超材料由直径 240nm、高度为 225nm 的近似圆柱形的单晶 LiNbO₃ 纳米柱周期阵列构成, 晶格常数为 300nm, 如图 3(c)所示. 通过 BLS 法可以直接测得 GHz 频率范围的带隙. 与多孔超材料产生的 Bragg 带隙不同, 柱-基超材料中的柱体不仅可以作为周期散射体, 产生 Bragg 散射带隙, 还可以与基底作用产生局域共振出现较

窄的亚波长带隙. Dehghannasiri 等^[55]首次在 COMS 兼容的压电平台上进行了超高频率下基于氮化铝支柱的表面波超材料的实验, 实验结果表明, 在 1.65GHz 处存在一个 150MHz 宽的带隙, 并且非金属的支柱减少了整体的声子损耗. 此类柱基结构的优势在于带隙频率对于周期和缺陷不敏感, 同时兼具局域共振机制和 Bragg 散射机理的带隙. 并且可以通过改变柱体的材料和几何结构来调整带隙的位置和宽度.

1.3 三维纳尺度超材料

相较于一维及二维超材料,三维的纳尺度超材料结构更复杂,制备更困难. 常见的三维超材料制备方法是将多层二维结构堆叠组成三维超材料或者自组装法^[56]. 由一种或多种纳米颗粒自组装而成纳米胶体超材料. 此类结构的优点是可以调整纳米颗粒的材质,大小以及基体的材料来调整带隙频率范围. 胶体纳米晶体的尺寸通常低于 20nm,由几十或者几百个原子组成,由一种或者多种胶体纳米晶体有序排布组合构成的纳尺度超材料由于其独特的振动模式,将在传统结构无法达到的声子能量和尺度范围发挥巨大作用^[57, 58].

Wu 等^[59]采用高分辨 BLS 实验研究了蒸发诱导自组装胶态聚苯乙烯-聚二甲基硅氧烷晶体的三维超材料的各向异性晶格膨胀对 GHz 范围声子能带结构的影响. 结果表明,在不影响面内结构的情况下,结构各向异性扩展后,高超声子能带结构

向低频偏移. 由于方法简单,这一技术在设计和制造具有可调谐特性的三维声子器件方面具有很大的潜力. Zhu 等^[60]实验测量了三维超高频胶体晶体的色散关系. 结果表明,在约 5GHz 处存在带隙. Alonso-Redondo 等^[61]采用密集聚合物束缚纳米胶体颗粒而成的自组装结构实现了杂化声子带隙,如图 4(a)所示. 通过多重散射理论和 BLS 分析表明,声子性质可以通过颗粒(和聚合物)组分、颗粒大小和系链聚合程度的变化来调节. 此类结构中存在 4 种振动模式^[57]: (1)配体分子的特征振动; (2)纳米胶体核心材料原子晶格中的声子; (3)纳米胶体核内原子的振动; (4)纳米胶体固体表现出的“集体振动”,即固体中两个或多个纳米胶体的相关运动,而这些运动在单个、孤立的纳米胶体中不存在,如图 4(b)所示.

除了以上较为常见的超材料形式外,近年来还发展出了三维 DNA 折纸超材料^[62-64], 纳米水凝胶^[65,66]等.

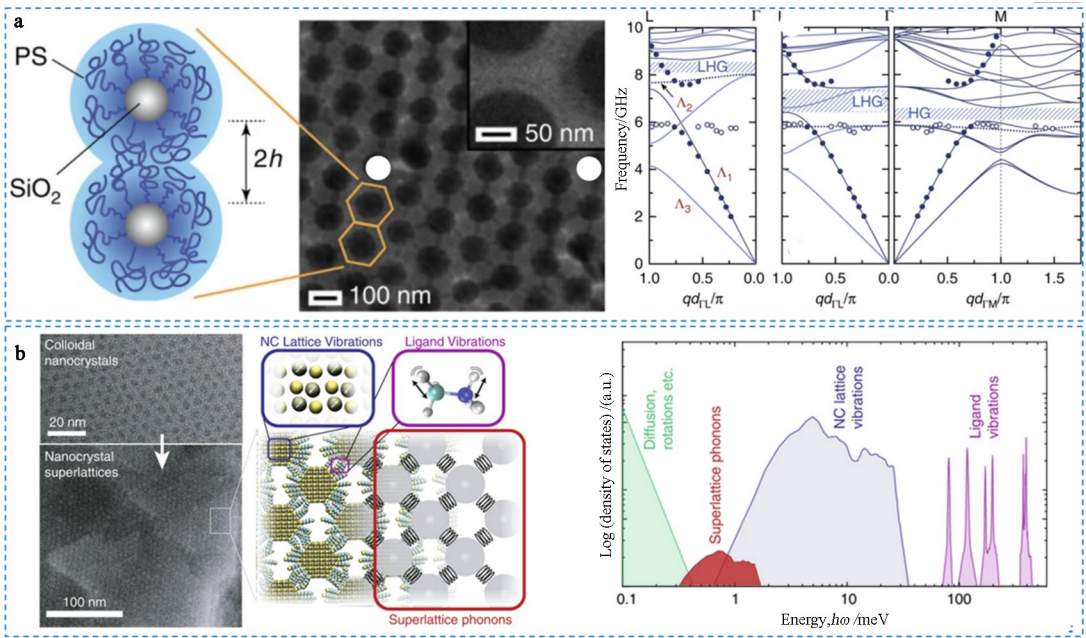


图 4 典型三维纳尺度超材料: (a)自组装纳米胶体颗粒超材料的透射电子显微镜图像,理论和实验得到的超材料的能带结构^[61]; (b)自组装纳米胶体超材料的模型及其 4 种振动模式^[57]

Fig.4 Typical structures of three-dimensional nanoscale metamaterials: (a) Transmission electron microscopy image of the self-assembled nanocolloid, theoretical versus experimental band structure of the metamaterial^[61]; (b) Model of the self-assembled nanocolloid metamaterial and their four vibration modes^[57]

2 纳尺度超材料的热输运

纳尺度的超材料在声子热输运方面也发挥着重要作用,能够大大提高 NEMS 器件的散热能力,也能实现结构热导率的大幅度降低. 通常情况下通

过在结构中引入夹杂,缺陷或者合金等改变其热导性能. 近年来,研究者们提出了通过调控局域原子振动^[31, 67-70],改变声子频散关系,从而改变热传导性能的方式. 另一种方式则是通过界面声子 Bragg 散射^[71-74],调控热输运性能.

Maldovan^[75]设计了一种含周期纳米孔洞的合金薄膜, 将热流从粒子转换为波输运, 即像光子晶体和声子晶体分别传导光和声一样导热. 进一步能实现热波导, 热成像, 热隐身等功能. Davis 等^[67]首次通过在硅基纳米薄膜上周期排布硅纳米柱实现了局域共振机理降低结构的热导率. 由于纳米柱的局域共振和底层的薄膜内原子晶格色散之间的杂化机制, 极大地降低了杂化位置的声子群速度, 如图 5(a) 所示, 进而大大降低了结构的热导率. Luckyanova 等^[76]通过实验观测以及第一性原理计算研究了周期堆叠的 GaAs/AlAs 纳米超晶格结构[如图 5(b)]的相干热传导, 结果表明界面粗糙度可以有效地破坏高频声子的相干性, 但对低频声子的散射没有影响. 对于含周期孔洞式的结构, 孔洞的粗糙度的增大可以增强边界散射的强度, 孔洞的大小和孔洞率也会改变声子中被散射的比例, 从而显著地降低热导率. 通过界面声子散射改变热导的方式依赖于周期性和波的干涉, 对于缺陷、无序和界面的粗糙度比较敏感.

对于纳尺度超材料的热导率的研究由于结构尺度非常小, 实验操作较为困难, 因此发展了一系列的理论方法, 如玻尔兹曼输运方程(Boltzmann Transport Equation, BTE)^[77], 非平衡格林函数(Nonequilibrium Green's Function, NEGF)^[78]和分子动力学方法. 其中较为常用的方法是分子动力学方法, 又分为平衡态分子动力学(EMD)^[74, 79-81]和非平衡态分子动力学(NEMD)^[82-85]. Wu 等^[86]采用 GPUMD 研究了一种独特的石墨烯/六方氮化硼异质结构的导热性. 与传统的超晶格不同, 这种异质结构的界面与热流方向平行. 研究表明, 该异质结构的导热系数低于石墨烯和氮化硼的导热系数. 相关的声子分析表明, 界面应力和不均匀的质量分布增强了声子散射, 如图 5(c) 所示. GPUMD 作为一个近年来新兴的利用图形处理器(显卡)加速的分子动力学模拟软件包, 以 NEP(Neuroevolution Potential)^[87]作为主要势函数, 计算速度快, 精确度高. 在力学性质^[88]和热输运^[89-93]计算方面有其独特的优势.

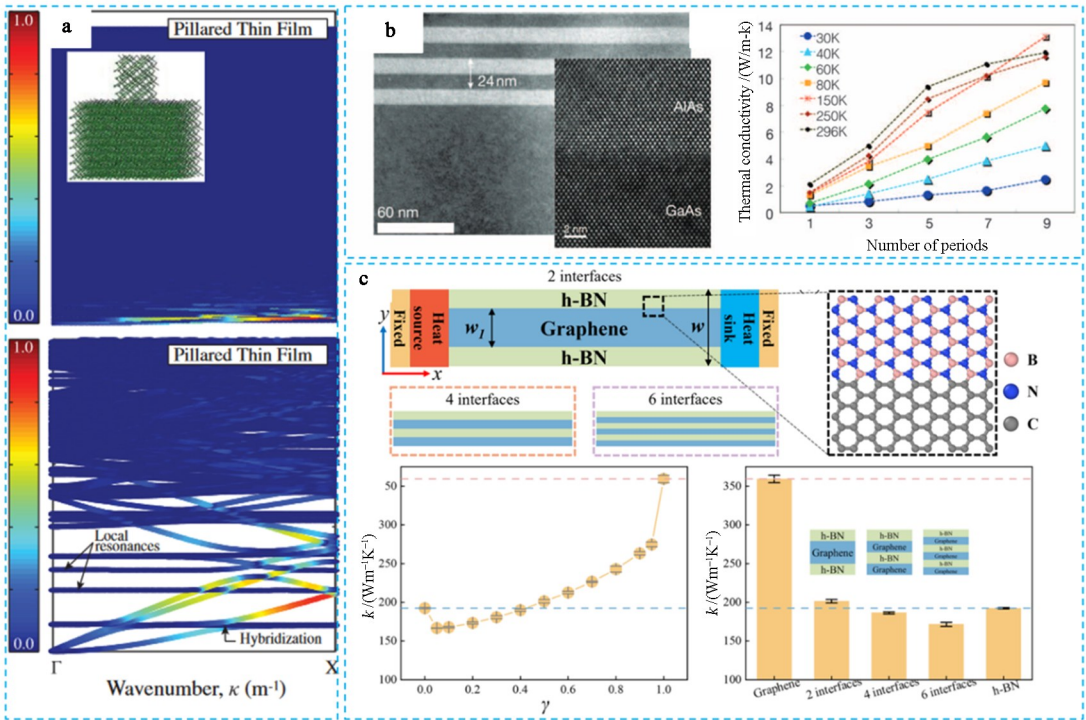


图 5 典型超材料结构的热输运性质: (a) 柱一基纳米超材料的分子模型及声子频散曲线^[67]; (b) 周期堆叠的 GaAs/AlAs 纳米超晶格的透射电镜图, 不同温度下超晶格的热导率随晶体周期数的变化曲线^[76]; (c) 石墨烯/六方氮化硼异质结构的模型, 异质结构的热导率随石墨烯面积占结构总面积比值(左下)以及界面数量(右下)变化的规律^[86]

Fig. 5 Thermal transport properties of typical metamaterial structures: (a) Molecular model and phonon dispersion of the pillared thin film metamaterial^[67]; (b) Transmission electron microscopy image the period-stacked GaAs/AlAs superlattice, measured thermal conductivity of the superlattice as a function of number of periods for different temperatures^[76]; (c) Model of graphene/h-BN heterostructure, the curve of the thermal conductivity of the heterostructure with the ratio of graphene area to the total area of the structure (bottom left) and the number of interfaces (bottom right)

3 纳尺度超材料的光—机—电耦合

NEMS 的服役环境非常复杂,多场耦合是更加符合实际应用的场景.若在周期结构中同时约束光模和机械模则可以大大增强光与物质的相互作用,从而制造光机械晶体. Madiot 等^[16]提出了一个二维硅声子超材料波导,在 2.3GHz 宽的机械带隙内维持近 7GHz 的单个声波带,通过 BLS 进行了证实.并利用光—机械相互作用,在室温下直接在声子波导内产生相干声子.为了实现这一点,通过将两个相同的超材料腔由空气槽光子波导分离开,从而获得光力学界面.该槽允许光被限制在无序诱导的局部腔中,并与之强烈相互作用,实现光的读出和放大,如图 6(a)所示.所获得的光机械耦合强度足以在相对低的输入功率下直接在波导内产生相干声子.引导波通过稳定的物理通道对于可靠的信息传输至关重要.然而,在高频机械系统中,由于

反向散射和损耗,能量传输对缺陷和急转弯特别敏感.凝聚态体系中的拓扑现象表现出对缺陷和单向能量传播的免疫. Cha 等^[94]研究了在 10MHz~20MHz 范围工作的独立氮化硅纳米膜的二维阵列.通过实验证明了边缘态的存在,并描述了它们的局域化和狄拉克锥状频散.在光机耦合的过程中还存在着严重的光能,热能和机械能的损耗, Zhang 等^[95]展示了在 5nm 尖端支撑的纳米光机械超表面上实现高质量的 5GHz 光声振动和超快光机械全光操作,如图 6(b)所示.该结构增强了输入到超表面的光能,关闭了机械和热输出损失通道,从而显著提高了超表面的光机械转换效率和振荡质量.与常见的硅基纳米周期孔结构相比,质量因子提高了几个数量级. Eichenfield 等^[39]开展了一种基于硅芯片的平面光力晶体的设计、制造和表征研究,该晶体能够共定位和强耦合 200THz 的光子和 2GHz 的声子.该实验为芯片级平台中探测、操纵

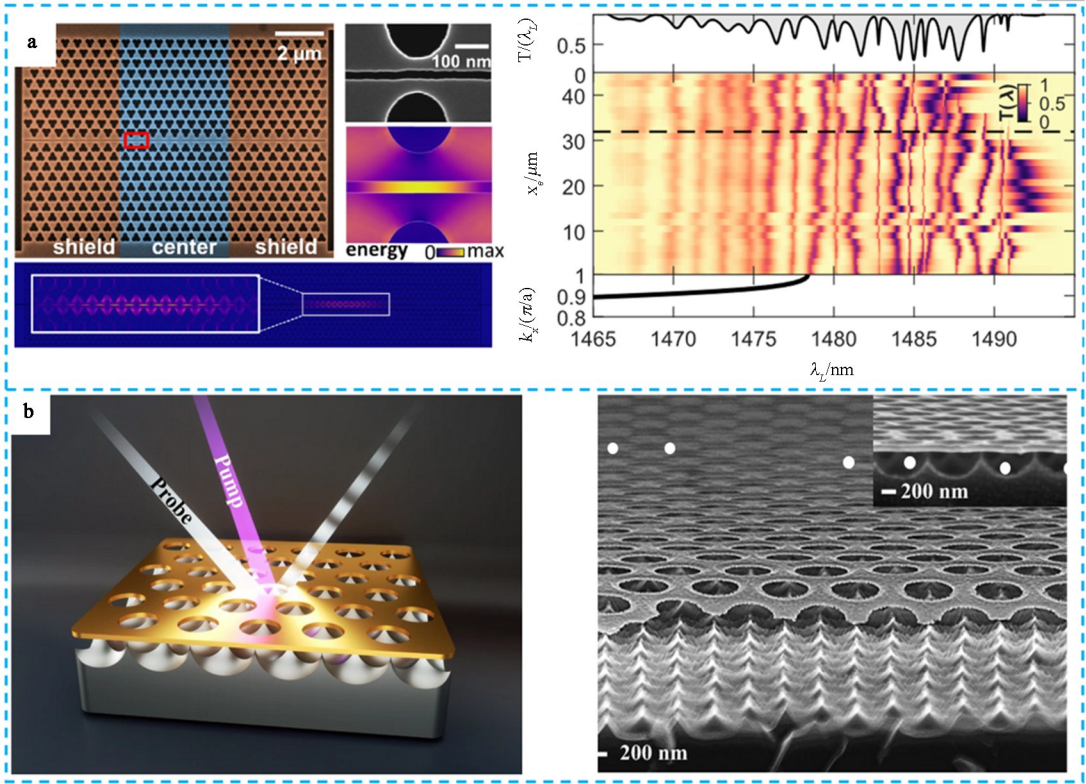


图 6 典型纳尺度超材料的多场耦合: (a) 完美槽和无序槽中电磁能量密度的有限元模拟^[16]; (b) 小于 5nm 的尖端支撑的纳米光机械超表面^[95]

Fig. 6 Multi-field coupling of typical nanoscale metamaterials: (a) FEM simulations of the electromagnetic energy density in both a perfect and disordered slot^[16]; (b) Sub-5nm tip-supported nano-optomechanical metasurface^[95]

和激发线性和非线性力和光相互作用的新方法铺平了道路. Cha 等^[96]实验研究了一种一维非线性纳机电超材料在射频域(10MHz~30MHz)内弯曲波带隙的主动控制,周期排布纳米膜的频散可以通

过施加直流栅极电压在很宽的范围内调谐. 直流调谐可用于移动带隙边界,减小带隙宽度和控制群速度等.

纳尺度超材料不仅仅能实现光—机—电多场

的耦合,提高 NEMS 的性能,同时又能利用光力学非线性,通过光子-声子相互作用来控制光速,实现可调谐光延迟^[97]等功能。

4 总结和展望

纳尺度下,超材料因其边界散射或者局域原子的共振,同样具有振动噪声抑制功能。声子频率在 GHz 和 THz 等高频范围,可以作为量子通信,热管理等领域应用的桥梁。调控高频下的声子,需要超材料的尺度小至纳尺度甚至埃级别,现有的技术已能够满足此精度的结构制备。当超材料结构拥有声子带隙,为了能够在更大或者不同的频率范围内减振降噪,则要求结构在光,电,应力场作用下,能够实现带隙的动态调控。纳尺度超材料声子带隙的研究对于 NEMS 的减振降噪和性能的提升有着至关重要的作用。

除了能够满足超高频声子调控的基本要求外,量子通信等领域还要求 NEMS 能够保持高的品质因子。实际上,NEMS 的服役环境是复杂甚至是极端的,要求结构更高强度、高韧性,耐高温、高压等。而且关于 NEMS 性能的研究也趋于多功能化,多场耦合等。对于声子的调控不仅能够降低机械能和热能的损耗,还能与光子等进行相互作用,产生意想不到的新现象和性能的提升。因此,纳尺度超材料多场耦合的研究是量子时代潜在应用领域的基础和未来研究方向。

参考文献

- [1] BUNCH J S, VAN DER ZANDE A M, VERBRIDGE S S, et al. Electromechanical resonators from graphene sheets [J]. *Science*, 2007, 315 (5811): 490—493.
- [2] JIANG J N, WANG L F, ZHANG Y Q. Vibration of single-walled carbon nanotubes with elastic boundary conditions [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 122: 156—166.
- [3] LIU R M, WANG L F, ZHAO J H. Nonlinear vibrations of circular single-layer black phosphorus resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113 (21): 211901.
- [4] MOON J, LATOUR B, MINNICH A J. Propagating elastic vibrations dominate thermal conduction in amorphous silicon [J]. *Physical Review B*, 2018, 97(2): 024201.
- [5] WANG L F, HU H Y, LIU R M, Thermal Vibration of Carbon Nanostructures [M]//Hsueh C H, Schmauder S, Chen C S, et al. *Handbook of Mechanics of Materials*. Singapore: Springer, 2019: 421—481.
- [6] LIU R M, WANG L F. Nonlinear forced vibration of bilayer van der Waals materials drum resonator [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(14): 145105.
- [7] ZHANG Y Q, WANG L F. Effects of the van der waals force on the vibration of typical multi-layered two-dimensional nanostructures [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 644.
- [8] SHAO L, GOKHALE V J, PENG B, et al. Femtometer-amplitude imaging of coherent super high frequency vibrations in micromechanical resonators [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 694.
- [9] HOU D C, WANG L F, YAN J W. Vibration analysis of higher-order nonlocal strain gradient plate via meshfree moving Kriging interpolation method [J]. *Engineering Structures*, 2023, 297: 117001.
- [10] LANZILLOTTI-KIMURA N D, FAINSTEIN A, PERRIN B, et al. Bloch oscillations of THz acoustic phonons in coupled nanocavity structures [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(19): 197402.
- [11] CHAN J, MAYER ALEGRE T P, SAFAVINAIEINI A H, et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state [J]. *Nature*, 2011, 478: 89—92.
- [12] CANG Y, JIN Y B, DJAFARI-ROUHANI B, et al. Fundamentals, progress and perspectives on high-frequency phononic crystals [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2022, 55(19): 193002.
- [13] REN H J, SHAH T, PFEIFER H, et al. Topological phonon transport in an optomechanical system [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3476.
- [14] FLOREZ O, ARREGUI G, ALBRECHTSEN M, et al. Engineering nanoscale hypersonic phonon transport [J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17: 947—951.
- [15] JING Y B, WANG L F. Elastic wave propagation in a single-layered hexagonal boron nitride metamaterial [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131 (18): 185104.
- [16] MADIOT G, NG R C, ARREGUI G, et al. Optomechanical generation of coherent GHz vibrations in

- a phononic waveguide [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(10): 106903.
- [17] MALDOVAN M. Sound and heat revolutions in phononics [J]. *Nature*, 2013, 503: 209—217.
- [18] 吴九汇, 马富银, 张思文, 等. 声学超材料在低频减振降噪中的应用评述[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(13): 68—78.
- WU J H, MA F Y, ZHANG S W, et al. Application of acoustic metamaterials in low-frequency vibration and noise reduction [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(13): 68—78. (in Chinese)
- [19] 王伟能, 杨晓东, 张伟. 二维三角陀螺声子晶体的波调控研究[J]. *动力学与控制学报*, 2021, 19(1): 75—79.
- WANG W N, YANG X D, ZHANG W. Study on wave manipulation in 2-D triangular gyroscope phononic crystals [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2021, 19(1): 75—79. (in Chinese)
- [20] GAO Y Q, WANG L F. Nonlocal active metamaterial with feedback control for tunable bandgap and broadband nonreciprocity [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 219: 107131.
- [21] 尹剑飞, 蔡力, 方鑫, 等. 力学超材料研究进展与减振降噪应用[J]. *力学进展*, 2022, 52(3): 508—586.
- YIN J F, CAI L, FANG X, et al. Review on research progress of mechanical metamaterials and their applications in vibration and noise control [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(3): 508—586. (in Chinese)
- [22] 夏百战, 杨天智. 声学超材料和声子晶体研究进展[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(7): 1—4.
- XIA B Z, YANG T Z. Progress in Acoustic Metamaterials and Phononic Crystal [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(7): 1—4. (in Chinese)
- [23] 刘宏, 余江, 张凯, 等. 多稳态力学超材料带隙特性及调控研究[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(7): 5—11.
- LIU H, YU J, ZHANG K, et al. Multi-stable mechanical metamaterials for band gap tuning [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(7): 5—11. (in Chinese)
- [24] YU X, WANG L F. Nonlinear dynamics of coupled waves in Kresling origami metamaterials [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 577: 118263.
- [25] 彭华新, 周济, 崔铁军, 等. 中国战略性新兴产业—前沿新材料: 超材料[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2020.
- [26] SIGALAS M M, ECONOMOU E N. Elastic and acoustic wave band structure [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 158(2): 377—382.
- [27] KUSHWAHA M S, HALEVI P, DOBRZYNSKI L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 2022—2025.
- [28] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials [J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734—1736.
- [29] MA G C, SHENG P. Acoustic metamaterials: from local resonances to broad horizons [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1501595.
- [30] 张研. 声子晶体的计算方法与带隙特性[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHANG Y. Phononic crystal calculation method and band gap properties [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [31] LI B, TAN K T, CHRISTENSEN J. Tailoring the thermal conductivity in nanophononic metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(14): 144305.
- [32] MILLER R E, SHENOY V B. Size-dependent elastic properties of nanosized structural elements [J]. *Nanotechnology*, 2000, 11(3): 139—147.
- [33] WANG L F, HU H Y. Size effects on effective Young's modulus of nano crystal copper wires [J]. *International Journal of Computational Methods*, 2005, 2(3): 315—326.
- [34] 刘赛赛, 王立峰. 氧化锌纳米线振动问题研究[J]. *动力学与控制学报*, 2017, 15(4): 373—380.
- LIU S S, WANG L F. Vibration of zinc oxide nanowires [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(4): 373—380. (in Chinese)
- [35] ZHANG S Z, GAO Y W. Surface effect on band structure of flexural wave propagating in magnetoelastic phononic crystal nanobeam [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(44): 445303.
- [36] QIAN D H. Bandgap properties of a piezoelectric phononic crystal nanobeam with surface effect [J]. *Journal of Applied Physics* 2018, 124(5): 055101.
- [37] ZHOU W J, CHEN W Q, MUHAMMAD, et al. Surface effect on the propagation of flexural waves in periodic nano-beam and the size-dependent topol-

- ological properties [J]. *Composite Structures*, 2019, 216: 427—435.
- [38] GOMIS-BRESCO J, NAVARRO-URRIOS D, OUDICH M, et al. A one-dimensional optomechanical crystal with a complete phononic band gap [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4452.
- [39] EICHENFIELD M, CHAN J, CAMACHO R M, et al. Optomechanical crystals [J]. *Nature*, 2009, 462: 78—82.
- [40] ZIVARI A, STOCKILL R, FIASCHI N, et al. Non-classical mechanical states guided in a phononic waveguide [J]. *Nature Physics*, 2022, 18: 789—793.
- [41] RAMPRASAD R, SHI N. Scalability of phononic crystal heterostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(11): 111101.
- [42] CHEN A L, WANG Y S. Size-effect on band structures of nanoscale phononic crystals [J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2011, 44(1): 317—321.
- [43] GOMOPOULOS N, MASCHKE D, KOH C Y, et al. One-dimensional hypersonic phononic crystals [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 980—984.
- [44] SCHNEIDER D, LIAQAT F, EL BOUDOUTI E H, et al. Engineering the hypersonic phononic band gap of hybrid Bragg stacks [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 3101—3108.
- [45] SCHNEIDER D, LIAQAT F, EL BOUDOUTI E H, et al. Defect-controlled hypersound propagation in hybrid superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(16): 164301.
- [46] LU L, RU C Q, GUO X M. Vibration isolation of few-layer graphene sheets [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 185: 78—88.
- [47] LU L, RU C Q, GUO X M. Metamaterial vibration of tensioned circular few-layer graphene sheets [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2020, 87(6): 061009.
- [48] BARÉ E, DANDU M, KUNDU S, et al. Engineering interlayer hybridization in van der Waals bilayers [J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9: 499—508.
- [49] JING Y B, WANG L F, GAO Y Q. Mass-spring model for elastic wave propagation in multilayered van der Waals metamaterials [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, 45(7): 1107—1118.
- [50] GORISHNYY T, ULLAL C K, MALDOVAN M, et al. Hypersonic phononic crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(11): 115501.
- [51] MACCABE G S, REN H J, LUO J, et al. Nano-acoustic resonator with ultralong phonon lifetime [J]. *Science*, 2020, 370(6518): 840—843.
- [52] KIRCHHOF J N, WEINEL K, HEEG S, et al. Tunable graphene phononic crystal [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(5): 2174—2182.
- [53] KIRCHHOF J N, BOLOTIN K I. Mechanically-tunable bandgap closing in 2D graphene phononic crystals [J]. *NPJ 2D Materials and Applications*, 2023, 7: 10.
- [54] YUDISTIRA D, BOES A, GRACZYKOWSKI B, et al. Nanoscale pillar hypersonic surface phononic crystals [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(9): 094304.
- [55] DEHGHANNASIRI R, EFTEKHAR A A, ADIBI A. Hypersonic surface phononic bandgap demonstration in a CMOS-compatible pillar-based piezoelectric structure on silicon [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(6): 064019.
- [56] CHENG W, WANG J J, JONAS U, et al. Observation and tuning of hypersonic bandgaps in colloidal crystals [J]. *Nature Materials*, 2006, 5: 830—836.
- [57] YAZDANI N, JANSEN M, BOZYIGIT D, et al. Nanocrystal superlattices as phonon-engineered solids and acoustic metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4236.
- [58] JANSEN M, TISDALE W A, WOOD V. Nanocrystal phononics [J]. *Nature Materials*, 2023, 22(2): 161—169.
- [59] WU S T, ZHU G H, ZHANG J S, et al. Anisotropic lattice expansion of three-dimensional colloidal crystals and its impact on hypersonic phonon band gaps [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, PCCP, 2014, 16(19): 8921—8926.
- [60] ZHU G H, SWINTECK N Z, WU S T, et al. Direct observation of the phonon dispersion of a three-dimensional solid/solid hypersonic colloidal crystal [J]. *Physical Review B*, 2013, 88(14): 144307.
- [61] ALONSO-REDONDO E, SCHMITT M, URBACH Z, et al. A new class of tunable hypersonic phononic crystals based on polymer-tethered colloids [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8309.
- [62] PARK S H, PARK H, NAM J M, et al. DNA ori-

- gami-designed 3D phononic crystals [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2611–2621.
- [63] ZHANG T, HARTL C, FRANK K, et al. 3D DNA origami crystals [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(28): e1800273.
- [64] MICHELSON A, SUBRAMANIAN A, KISSLINGER K, et al. Three-dimensional nanoscale metal, metal oxide, and semiconductor frameworks through DNA-programmable assembly and templating [J]. *Science Advances*, 2024, 10(2): ead10604.
- [65] PAN L J, YU G H, ZHAI D Y, et al. Hierarchical nanostructured conducting polymer hydrogel with high electrochemical activity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(24): 9287–9292.
- [66] DE FRANCE K J, HOARE T, CRANSTON E D. Review of hydrogels and aerogels containing nanocellulose [J]. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(11): 4609–4631.
- [67] DAVIS B L, HUSSEIN M I. Nanophononic metamaterial: thermal conductivity reduction by local resonance [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(5): 055505.
- [68] XIONG S Y, SÄÄSKILAHTI K, KOSEVICH Y A, et al. Blocking phonon transport by structural resonances in alloy-based nanophononic metamaterials leads to ultralow thermal conductivity [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(2): 025503.
- [69] SPANN B T, WEBER J C, BRUBAKER M D, et al. Semiconductor thermal and electrical properties decoupled by localized phonon resonances [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(26): e2209779.
- [70] LI W K, ZHANG W T, HUANG X Y, et al. Regulating phonon transport in silicon nanofilms by resonant nanopillars [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 220: 124955.
- [71] CELEBI K, BUCHHEIM J, WYSS R M, et al. Ultimate permeation across atomically thin porous graphene [J]. *Science*, 2014, 344(6181): 289–292.
- [72] GUO Y Y, BESCOND M, ZHANG Z W, et al. Thermal conductivity minimum of graded superlattices due to phonon localization [J]. *APL Materials*, 2021, 9(9): 091104.
- [73] LIU Y Z, LIU Y N, YUE J C, et al. Modulation of interface modes for resonance-induced enhancement of the interfacial thermal conductance in pillar-based Si/Ge nanowires [J]. *Physical Review B*, 2023, 108(23): 235426.
- [74] XIAO P, EL SACHAT A, ANGEL E C, et al. MoS₂ phononic crystals for advanced thermal management [J]. *Science Advances*, 2024, 10(13): eadm8825.
- [75] MALDOVAN M. Narrow low-frequency spectrum and heat management by thermocrystals [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(2): 025902.
- [76] LUCKYANOVA M N, GARG J, ESFARJANI K, et al. Coherent phonon heat conduction in superlattices [J]. *Science*, 2012, 338(6109): 936–939.
- [77] LINDSAY L, HUA C, RUAN X L, et al. Survey of ab initio phonon thermal transport [J]. *Materials Today Physics*, 2018, 7: 106–120.
- [78] GUO Y Y, BESCOND M, ZHANG Z W, et al. Quantum mechanical modeling of anharmonic phonon-phonon scattering in nanostructures [J]. *Physical Review B*, 2020, 102(19): 195412.
- [79] VOLZ S G, CHEN G. Molecular-dynamics simulation of thermal conductivity of silicon crystals [J]. *Physical Review B*, 2000, 61(4): 2651–2656.
- [80] YANG L N, YANG N, LI B W. Extreme low thermal conductivity in nanoscale 3D Si phononic crystal with spherical pores [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 1734–1738.
- [81] CAI Q R, SCULLION D, GAN W, et al. High thermal conductivity of high-quality monolayer boron nitride and its thermal expansion [J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaav0129.
- [82] YANG L N, CHEN J, YANG N, et al. Significant reduction of graphene thermal conductivity by phononic crystal structure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 91: 428–432.
- [83] HU S Q, ZHANG Z W, JIANG P F, et al. Randomness-induced phonon localization in graphene heat conduction [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, 9(14): 3959–3968.
- [84] REN W J, OUYANG Y L, JIANG P F, et al. The impact of interlayer rotation on thermal transport across graphene/hexagonal boron nitride van der waals heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(6): 2634–2641.
- [85] WU X, HAN Q. Phonon thermal transport across multilayer graphene/hexagonal boron nitride van der waals heterostructures [J]. *ACS Applied Mate-*

- rials & Interfaces, 2021, 13(27): 32564—32578.
- [86] WU Z, LIU R M, WEI N, et al. Unexpected reduction in thermal conductivity observed in graphene/h-BN heterostructures [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2024, 26(5): 3823—3831.
- [87] FAN Z Y, ZENG Z Z, ZHANG C Z, et al. Neuro-evolution machine learning potentials: combining high accuracy and low cost in atomistic simulations and application to heat transport [J]. Physical Review B, 2021, 104(10): 104309.
- [88] YU M L, ZHAO Z Q, GUO W L, et al. Fracture toughness of two-dimensional materials dominated by edge energy anisotropy [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2024, 186: 105579.
- [89] KIM S E, MUJID F, RAI A, et al. Extremely anisotropic van der Waals thermal conductors [J]. Nature, 2021, 597: 660—665.
- [90] BARBALINARDO G, CHEN Z K, DONG H K, et al. Ultrahigh convergent thermal conductivity of carbon nanotubes from comprehensive atomistic modeling [J]. Physical Review Letters, 2021, 127(2): 025902.
- [91] CHENG Y J, FAN Z Y, ZHANG T, et al. Magic angle in thermal conductivity of twisted bilayer graphene [J]. Materials Today Physics, 2023, 35: 101093.
- [92] ERIKSSON F, FRANSSON E, LINDERÄLV C, et al. Tuning the through-plane lattice thermal conductivity in van der Waals structures through rotational disordering [J]. ACS Nano, 2023, 17(24): 25565—25574.
- [93] DONG H K, CAO C Y, YING P H, et al. Anisotropic and high thermal conductivity in monolayer quasi-hexagonal fullerene: a comparative study against bulk phase fullerene [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 206: 123943.
- [94] CHA J, KIM K W, DARAIO C. Experimental realization of on-chip topological nanoelectromechanical metamaterials [J]. Nature, 2018, 564: 229—233.
- [95] GAO R X, HE Y L, ZHANG D M, et al. Gigahertz optoacoustic vibration in Sub-5 nm tip-supported nano-optomechanical metasurface [J]. Nature Communications, 2023, 14: 485.
- [96] CHA J, DARAIO C. Electrical tuning of elastic wave propagation in nanomechanical lattices at MHz frequencies [J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(11): 1016—1020.
- [97] SAFAVI-NAEINI A H, MAYER ALEGRE T P, CHAN J, et al. Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics [J]. Nature, 2011, 472: 69—73.