

光学学报

基于黑磷的纳光机电磁矢量传感器设计

刘文耀^{1,2}, 刘晨曦^{1,2}, 李伟^{1,2}, 邢恩博^{1,2}, 周彦汝^{1*}, 陈建军², 唐军^{1,2}, 刘俊^{1,2**}

¹中北大学量子传感与精密测量仪器山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

²中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 基于二维材料的纳机电谐振器具有体积小、频率高、品质因数高等优势, 在传感领域具有很大的应用潜力。其中, 黑磷由于其波纹状的平面结构和各向异性的机械特性, 为平面内矢量传感提供了可能。利用黑磷设计了一种光学激发光学读出的新型纳光机电磁矢量传感器。利用有限元分析法, 探究了黑磷层数和长宽比对矢量性的影响, 确定了黑磷谐振器的尺寸为 $0.6 \mu\text{m} \times 0.134 \mu\text{m} \times 0.5 \text{nm}$; 分别探索了高杨氏模量和低杨氏模量方向对磁场响应的各向异性。通过谐振模式的空间分布, 解释了角度和长宽比对器件灵敏度和矢量性的影响机理。结果表明, 将磁场旋转 90° , 灵敏度可从 -4.048MHz/mT 变化为 5.796MHz/mT 。与精度相近的洛伦兹力的微机电传感器相比, 所设计传感器的频率可提高 6 个数量级, 尺寸可缩小 6 个数量级。该设计为新型纳光机电矢量传感器的制备提供了一种方法。

关键词 测量; 纳光机电谐振器; 黑磷; 光驱动; 磁矢量

中图分类号 TH741; O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0912006

Nano-Opto-Electromechanical Magnetic Vector Sensor Design Based on Black Phosphorus

Liu Wenyao^{1,2}, Liu Chenxi^{1,2}, Li Wei^{1,2}, Xing Enbo^{1,2}, Zhou Yanru^{1*}, Chen Jianjun²,
Tang Jun^{1,2}, Liu Jun^{1,2**}

¹ Shanxi Province Key Laboratory of Quantum Sensing and Precision Measurement, North University of China,
Taiyuan 030051, Shanxi, China;

² State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China,
Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract Nanomechanical resonant sensors based on two-dimensional materials have great potential in sensing with the advantages of small size, high frequency, and high-quality factor. Among them, black phosphorus provides a unique opportunity for in-plane vector sensing due to its corrugated planar structure and anisotropic mechanical characteristics. In this paper, a new type of a nano-opto-electromechanical magnetic vector sensor based on optically excited optical readout is designed using black phosphorus. Using the finite element analysis method, the influences of the number of layers and the length-width ratio of black phosphorus on the vector property are studied, and the system structure is optimized with the size of $0.6 \mu\text{m} \times 0.134 \mu\text{m} \times 0.5 \text{nm}$. The anisotropy of the response to the magnetic field in the directions of high Young's modulus and low Young's modulus is explored, respectively. By using the spatial distribution of resonant modes, the influences of the angle and length-width ratio on the sensitivity and vector property of the device are explained. It can be found that in the Armchair direction, when the magnetic field rotates 90° , the sensitivity changes from -4.048MHz/mT to 5.796MHz/mT . Compared with Lorentz

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-09; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61803350, 51821003, 51922009)、山西省应用基础研究计划(201901D211240)、量子传感与精密测量山西省重点实验室(201905D121001)、中北大学青年学术带头人支持计划

通信作者: *zhouyanru@nuc.edu.cn; **liujun@nuc.edu.cn

force-based micro-electromechanical sensors, the resonant frequency of the designed sensor can be improved by 6 orders of magnitude, and its size can be reduced by 6 orders of magnitude. This design provides a new method for the preparation of a nano-opto-electromechanical vector sensor.

Key words measurement; nano-opto-electromechanical resonator; black phosphorus; optical driving; magnetic vector

1 引言

谐振式微机电系统 (MEMS) 具有高稳定性、高灵敏度、高分辨率、低功耗等优点, 已被广泛应用于消费电子、工业控制、航空航天等领域, 其中, 以加速度计、陀螺仪、压力计和磁力计为代表的传感器占据了巨大的市场份额^[1-4]。MEMS 应用领域的不断深入使器件不断地向小型化、高精度迈进。然而, 传统的 MEMS 传感器主要使用金属或硅基材料制备谐振式敏感单元, 随着器件不断缩小, 器件达到纳米量级时表面效应和晶格缺陷会对器件性能产生极大影响。二维材料的出现为纳机电系统 (NEMS) 提供了难得的机遇, 特别是当材料厚度接近原子尺度时, 谐振子质量与尺寸的减小以及比表面积的增加, 不仅使材料特性得以保持, 传感精度也得到提高^[5]。

近年来, 随着激光加工手段的不断成熟, 基于石墨烯和过渡金属硫化物材料的二维 (2D) NEMS 器件日趋成熟^[6-7], 并迅速进入压力^[5, 8]、加速度^[9]、质量^[10]、声学^[11]、热学^[12]等传感领域。同时, 研究人员将 NEMS 的机械谐振子由电学驱动和读出改为光学的调控方式, 进而衍生出一类新型的纳光机电系统 (NOEMS)。借助光学的方式不仅能提升检测精度和抗电磁干扰能力, 而且能够拓宽传感器的动态范围, 有效地解决常规器件探测精度与动态范围的固有限制^[13-14]。然而, 上述材料在平面内具有机械各向同性, 仅借助单轴器件难以实现平面内的矢量性探测。

超薄层状黑磷 (BP) 具有优异的电学性能, 其独特的褶皱结构导致其在机械性能方面具有极强的各向异性, 这也为传感带来了更多可能^[15]。尤其是其“扶手椅”方向的高应变为纳机电系统的光学调控提供了独有的机会。但目前, 基于层状 BP 的传感研究分布于电化学、光电探测、光纤传感等领域^[16-20], 主要利用其大压阻特性和角张力的各向异性来制备高灵敏度、大动态范围的机械传感器^[21-22]。基于黑磷的 NOEMS 传感研究才刚起步。Wang 等^[15]使用数值模拟的方式率先探究了不同形状和取向下的谐振模式的选择特性, 并发现通过改变器件的几何形状和黑磷方向能够使谐振模式与谐振频率发生改

变, 从而使器件具有良好的矢量特性。之后, 该实验组通过在硅基圆孔上覆盖黑磷薄膜制备纳机械谐振器, 通过光驱动的方式获得了数十 MHz 的高频谐振, 并验证了其各向异性, 这为高灵敏度矢量传感提供了依据^[23]。Islam 等^[24]同样制备了黑磷纳光机电系统, 利用光读出方式实现了对黑磷晶体面内热导率的各向异性测试。但是目前将 BP NOEMS 用于矢量传感的报道还尚未出现。

本文以具有磁致伸缩特性的 Terfenol-D 为基底, 设计了一种新型的 BP NOEMS 磁矢量传感器。建立有限元模型, 探究 BP 谐振器的谐振频率随二维材料的层数和尺寸比的变化规律。改变 BP 谐振器的方向, 分别研究了器件在高杨氏模量和低杨氏模量方向上对磁场的各向异性响应。通过对谐振器的结构参数进行优化, 分别对其矢量性、灵敏度、线性度、分辨率进行了探究, 制备了纳光机电磁矢量传感器。

2 仿真

2.1 机械各向异性

如图 1(a) 所示, 黑磷的原子呈波纹状排列, 其超薄的单层结构可视为二维平面, 其垂直和正交方向具有不同的机械性能。如图 1(b) 所示, BP 在垂直方向的杨氏模量 E_{y_x} 为 166 GPa, 在水平方向的杨氏模量 E_{y_y} 为 44 GPa。通常, 将高杨氏模量方向称为“锯齿形”方向, 低杨氏模量方向 (E_{y_y}) 称为“扶手椅”方向。

由图 1(b) 可见, 杨氏模量的正交性差异会导致频率随应力方向发生变化, 这也是矢量传感的基础。为了验证这一机制, 建立了一个简单的模型, 该模型由 $0.1 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$ 的线性弹性方形单层 2D 薄膜单元组成, 将其分别沿石墨烯和黑磷的边缘双端固定, 形成双夹梁, 结构类似于文献[25]中的结构。利用 Comsol Multiphysics 对模型进行了仿真分析。如图 2 所示, 石墨烯具有高杨氏模量 (约 1000 GPa), 其共振频率明显高于黑磷, 尤其是其谐振基频比黑磷高约 40%。双夹梁的谐振基频可表示为

$$f(0) = A \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{L^2}, \quad (1)$$

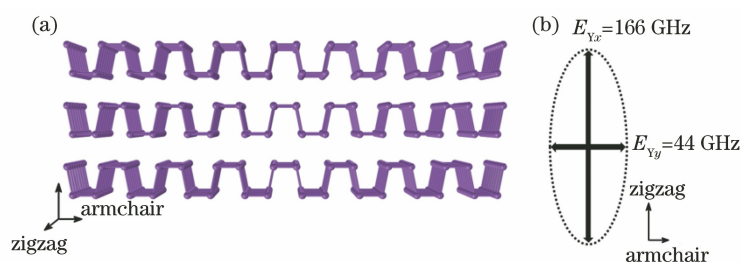


图 1 黑磷二维材料的结构和机械各向异性示意图。(a)材料结构示意图;(b)机械各向异性示意图

Fig. 1 Structure and mechanical anisotropy of 2D black phosphorus material. (a) Schematic diagram of material structure; (b) diagram of mechanical anisotropy

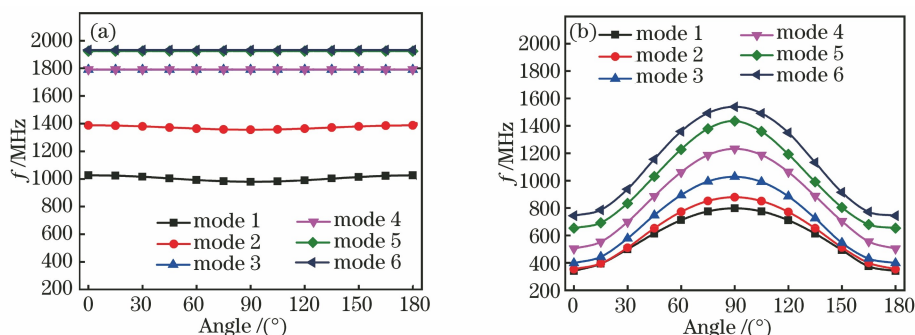


图 2 不同共振模式下石墨烯和黑磷的谐振频率与应力加载角度的关系。(a)石墨烯;(b)黑磷

Fig. 2 Resonant frequency as a function of stress loading angle in different resonant modes for graphene and BP. (a) Graphene; (b) BP

式中: A 为夹紧系数; E 为薄膜谐振结构的杨氏模量; ρ 为薄膜的密度; t 为膜的厚度; L 为薄膜悬挂在腔体上的长度。由式(1)可知,杨氏模量的不同会造成频率的差异。如图 2(a)所示,石墨烯的谐振频率几乎不随二维材料空间取向的变化而变化。但对 BP 而言,如图 2(b)所示,高阶模式与基模的现象基本相似,谐振频率在不同角度下的变化明显。在初始方向,即应力加载在低杨氏模量(“扶手椅”)方向,谐振器产生约 270 MHz 的谐振基频。当应力方向逐渐旋转达到 90° 时,共振频率达到峰值,约为 0° 时的 2.6 倍。同样地,这一频率的差异与杨氏模量的差异相关。此外,在 0° 和 180° 时共振频率有两个最小值,呈现对称分布。如果将这种各向异性加以利用并制成器件,与其他矢量性传感实验类似,通过在平面内沿固定方向进行旋转标定,就能利用强度与角度变量信息解析出方向信息,形成矢量性传感器。

2.2 器件的建模

本文围绕谐振式磁矢量传感器的各向异性进行了模型构建。如图 3 所示,传感器由 BP 谐振膜、硅/二氧化硅衬底和磁致伸缩填充物 Terfenol-D 组成。以尺寸为 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 的硅块为主体结构,通过刻蚀在其背面制备 $1.5\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m} \times$

$0.8\ \mu\text{m}$ 的空心结构。通过沉积工艺将厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 的片状 Terfenol-D 沉积到空心硅体中,使其随磁场大小和方向产生膨胀。之后,在硅衬底上方沉积一层厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的二氧化硅作为绝缘层,并在其中心刻蚀出一个尺寸略小于 BP、深度约为 $0.05\ \mu\text{m}$ 的矩形腔体。将尺寸为 $0.4\ \mu\text{m} \times 0.2\ \mu\text{m} \times 0.5\ \text{nm}$ 的 BP 膜均匀覆盖在氧化硅腔上,并在 BP 的四端蒸镀金电极约束二维结构,这就形成了悬浮式纳机电谐振器。为了降低谐振阻尼、提高信噪比和可靠性,需要对结构进行真空封装。

如图 3(c)所示,为了保证精度,器件谐振通过光激发/光读出方式实现,利用矢量网络分析仪对波长约为 $400\ \text{nm}$ 的激光进行交流驱动调制,再将光斑聚焦后入射到 BP 谐振器的表面,表面会因热光效应产生驱动力,使谐振器产生简谐振动。利用 $633\ \text{nm}$ 激光对谐振器的振动信息进行干涉检测,即通过膜表面和膜下面氧化硅腔体底部的反射光之间的干涉信息解析谐振器的振动信息^[23]。与常规 NEMS 的电驱动和电容检测相比,本系统采用激光驱动以及激光干涉读出的方法,具有高精度、快速响应和抗电磁干扰等优势^[14]。一方面,激光器具有低噪声和快速响应的特性,能够减小输入噪声,提升读

出精度和读取效率,从而提升测量精度、增大动态范围;另一方面,利用二维薄膜与氧化硅凹槽形成的 FP 腔有望制备腔光力系统,借助微腔的小模式体积和高品质因数能够进一步提升传感的灵敏度与精

度。当引入外部磁场时, Terfenol-D 将发生磁致伸缩变形,导致衬底硅材料变形,进而导致二氧化硅层在 BP 上施加横向应力 T ,使 BP 谐振器的谐振频率发生漂移,从而形成了磁场和共振频率的关联。

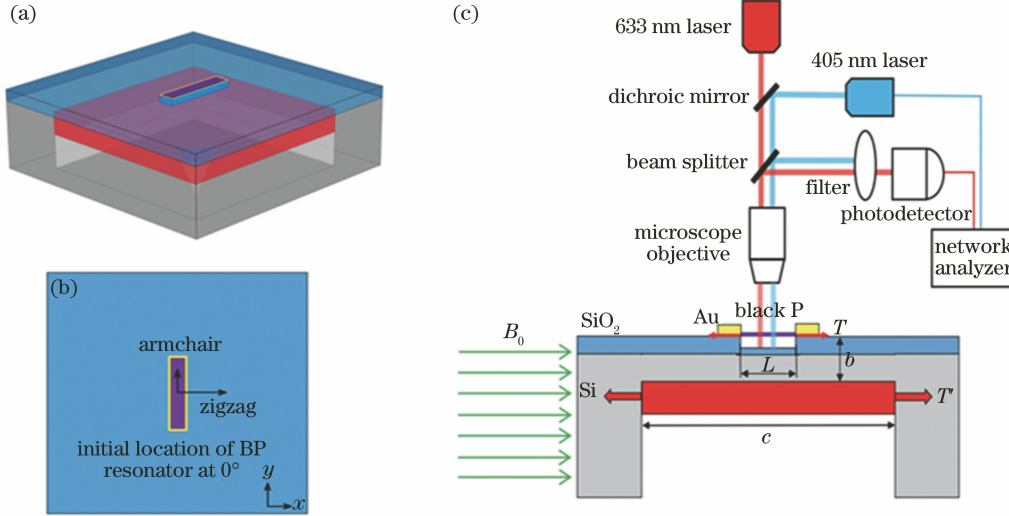


图 3 BP NOEMS 传感器。(a)三维示意图;(b)俯视图;(c)光驱动及读出系统

Fig. 3 BP NOEMS sensor. (a) 3D schematic diagram; (b) top view; (c) optical driving and readout system

一般地,当磁场强度的变化较小时,磁致应力与磁场之间的关系可以简单地表示为 $\alpha_B B$,其中, α_B 和 B 分别是 Terfenol-D 的磁致伸缩系数 ($5 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)和磁场强度。在本文中二氧化硅的厚度小于硅的厚度,可以将应力传导层近似为硅层。作用在谐振器上的应力表示为

$$\sigma_x = \gamma \sigma_B = \frac{6(1 + \nu_{\text{Si}})}{\pi^2} \left(\frac{c}{2b}\right)^2 \gamma \alpha_B B, \quad (2)$$

式中: γ 是衬底上的应力向谐振器约束边缘传递的系数; $\nu_{\text{Si}} = 0.22$ 是 Si 的泊松比; c 和 b 分别是 Si 腔的轴向长度和 Si 与 SiO_2 的厚度,详见图 3(c)。轴向应力 σ_x 下谐振器的基频^[26]为

$$f(\sigma_x) = f(0) \sqrt{1 + \frac{\sigma_x}{\sigma_c}}, \quad (3)$$

欧拉临界屈曲载荷 σ_c 为

$$\sigma_c = \frac{\pi^2 E t^2}{3L^2}, \quad (4)$$

$f(\sigma_x)$ 还可以表示为

$$f(\sigma_x) = A \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[1 + \frac{3(1 + \nu_{\text{Si}})c^2}{2\pi^2 b^2} \frac{3\gamma \alpha_B B L^2}{\pi^2 E t^2} \right]}, \quad (5)$$

从式(5)可知,在确定主体结构时,BP 共振频率与长度、厚度、磁场强度和角度等均有关联。然而,上述方程大多用于计算双边夹紧的薄膜,对于四边夹紧的器件仅能用于定性分析。此外,当 BP 的形状不

再是空间对称结构时,上述因素的影响变得更加复杂。因此,为了研究这种结构中 BP 的频率变化,使用有限元法来优化 BP NOEMS 谐振器的相关参数,以进一步提高传感器的方向性和灵敏度,具体参数如表 1 所示。

表 1 材料的力学参数

Table 1 Material mechanical parameters

Material	Parameter	Value
BP ^[27]	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2690
	Poisson's ratio	0.62, 0.17, 0
	Young's modulus / GPa	166, 44, 0.24
	Shear modulus / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	41, 41, 0.24
Terfenol-D ^[28]	Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	9250
	Conductivity / ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.66×10^7
	Young's modulus / Pa	4×10^{10}
	Poisson's ratio	0.45
	Saturation magnetization / ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	6.36×10^7
	Initial magnetic susceptibility	18
	Saturation magnetostriction coefficient	8×10^{-4}

3 分析与讨论

3.1 器件参数优化与矢量性表征

为了找到矢量性能优越的结构,通过改变厚度和长宽比(r),分别研究了 BP 谐振器的矢量特性。

将磁场 B 固定为 100 mT, 长宽比设置为 2, 分别研究了锯齿形和“扶手椅”方向的频率。其中, 将“扶手椅”方向设定为 0° , 锯齿形的方向设定为 90° 。从图 4(a) 可见, 高杨氏模量的方向频率较高, 在单层石墨烯结构下, 其频率是低杨氏模量的 3.4 倍。此外, 谐振频率也随着 BP 层数的增加呈现逐步增加的趋势, 但是频率差却缓慢减小。其中, 单层 BP 的频差最大, 是双层 BP 的 2 倍以上。因此, 后续工作基于单层 BP 开展。

探讨了长宽比对矢量化影响, 为了减少变量, 将 BP 面积始终保持在 $0.08 \mu\text{m}^2$ 。由图 4(b) 可见,

谐振器的形状对方向性改善有重要的作用。随着宽度逐渐变小, 锯齿方向的应力区间逐渐减小, 从而导致共振频率呈现逐渐增大的趋势。相反, 在“扶手椅”方向, 长边尺寸逐渐增加导致频率逐渐减小。但是, 当角度为 0° 时, 却存在特殊现象, 即长宽比达到 4.5 和 5 时, 共振频率开始逐渐增加, 这导致频率差随着长宽比的增加呈现先缓慢增加后急剧减小的趋势。当长宽比约为 4.5 时, 共振频率达到最大值, 这为结构选择提供了依据。综上所述, 基于矢量性, 将 BP 谐振器的尺寸设为 $0.6 \mu\text{m} \times 0.134 \mu\text{m} \times 0.5 \text{ nm}$ 。

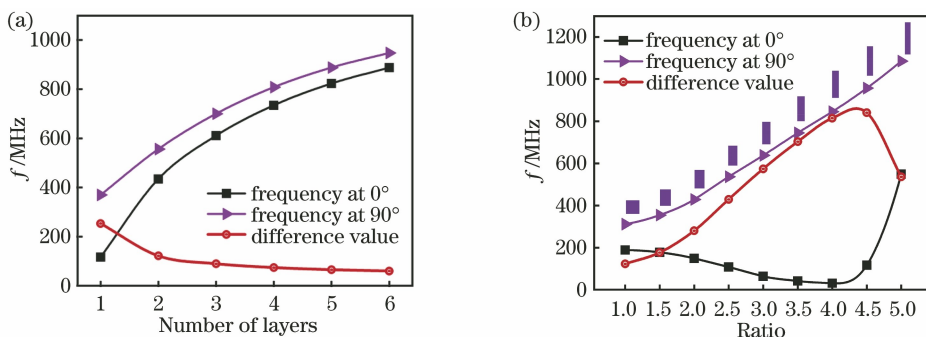


图 4 不同层数和长宽比下 BP 的谐振频率及其正交方向上的频率差。(a) 谐振频率随层数的变化; (b) 谐振频率随长宽比的变化

Fig. 4 Resonant frequency and frequency difference in orthogonal direction of BP for different number of layers and length-width ratio. (a) Resonant frequency varying with number of layers; (b) resonant frequency varying with length-width ratio

为了探究图 4(b) 中频率差随着长宽比的增大逐渐减小的原因, 选取了长宽比为 3.5, 4, 4.5, 5 的 4 个结构, 对其基模的空间分布进行研究, 如图 5 所示。为了便于空间比较, 在“扶手椅”方向截取了相同的尺寸。由图 5 可见, 振动模式分布沿长边呈椭圆形分布, 而且器件处于 90° 时模式相对分散, 同时振幅较小, 这与宽边尺寸较小且相对应应变较小有关。当器件处于 90° 时, 磁场产生的应力方向沿锯齿方向。随着宽度逐渐变窄, 模式分布在空间上逐渐缩

小, 因此频率呈现逐渐增加的趋势。然而, 当应力沿扶手椅方向时, 不难发现, 随着长度的增加, 模式分布未明显向长边扩展, 反而呈现逐渐局域的现象。特别是当长宽比大于 4 时, 模式的空间分布并没有向长边延伸, 而是更加局部化, 振幅也随之增加。从图 5 中的虚线框可见, 中心共振区间的两侧出现波节线, 并且随着长宽比的增加, 波节趋于明显, 因此导致频率呈现逐渐增加的趋势。

为了探索不同模式下共振频率特性, 在图 6 中

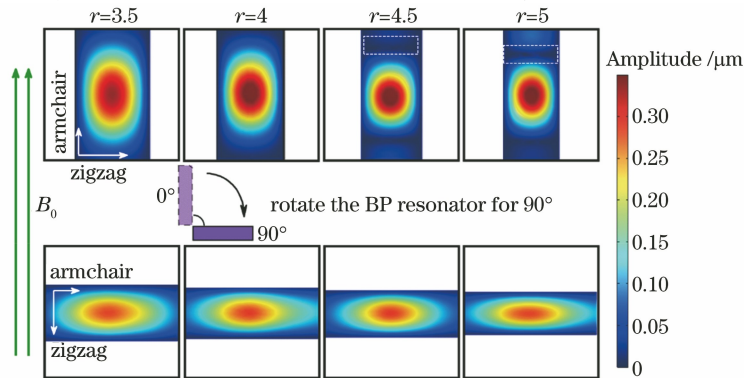


图 5 谐振基模的空间分布随长宽比的变化情况

Fig. 5 Spatial distributions of resonant fundamental modes varying with length-width ratio

选择了三种类型的模式分布进行研究。图 6 直观地显示了当谐振器从“扶手椅”形旋转到锯齿形(即 0° 到 90°)时频率变化的过程。磁场仍为 100 mT,长宽比为 4.5。为了突出模式分布,同样截取谐振器的振动区间。随着拉伸角度(即磁场引起的应力方向)的变化,高阶模和低阶模在空间上呈

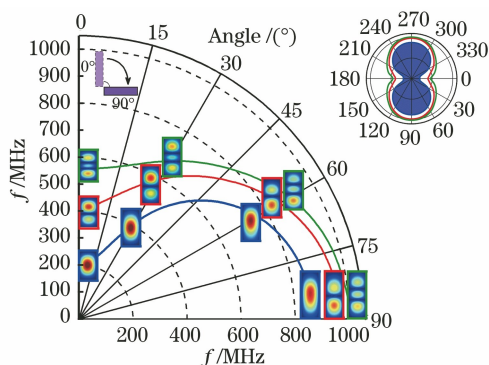


图 6 BP 谐振器三种谐振模式的极坐标图(插图是三种谐振模式的空间指向性)

Fig. 6 Polar coordinate diagram of three resonant modes of BP resonator (insert is spatial directivity of three resonant modes)

现类似的分布状态,均在拉伸方向存在局域效应。以三阶共振为例,当角度为 0° 时,磁致应力方向沿着长边方向分布,但是模式却未向长边方向扩展,反而在长边方向更加局域;但当角度为 90° 时,模式的空间分布却沿长边方向逐渐分散。

从图 6 插图中可以发现,谐振频率随着模式阶数的增加逐渐增加,其中基模下正交方向的频率差最大,即矢量性最好。尽管在高阶模下灵敏度会增加,但考虑到单矢量传感器的方位分辨率或测向精度,选取基模进行传感。另外,通过改变黑磷形状的不对称性或通过传感器的空间组合也能够锐化其指向性。三个样品的共振频率随磁场的变化如图 7 所示。由图 7(a)和 7(b)可见,当长宽比为 4 和 4.5 时,曲线形状非常相似,即:当角度大于 30° 时,谐振频率随着磁场的增强逐渐增大;当角度小于 30° 时,谐振频率呈现减小的趋势;当长宽比为 5 时,由图 7(c)中可见,共振频率随着不同角度磁场的增强均呈现逐渐增加的趋势。

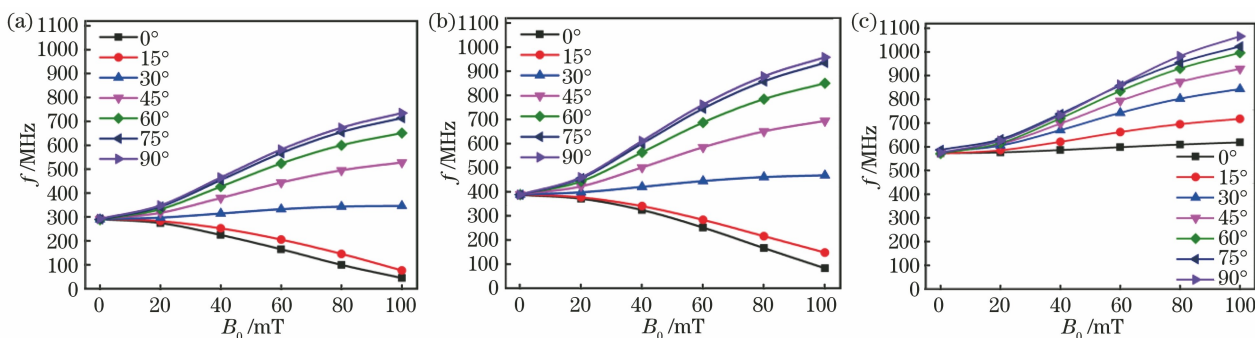


图 7 不同角度下 BP 的基本共振频率与磁场强度 B_0 的关系。(a)长宽比为 4;(b)长宽比为 4.5;(c)长宽比为 5

Fig. 7 Fundamental resonance frequency of BP varying with magnetic field intensity B_0 at different angles.

(a) Length-width ratio is 4; (b) length-width ratio is 4.5; (c) length-width ratio is 5

图 7 所示的现象同样可以用前文所述的模式空间分布和应力导致的尺寸形变解释。单层 BP 呈现褶皱状,当长宽比较小时,随着应力的增加,“扶手椅”方向发生形变,长度逐渐增加,因此频率随着磁场强度的增加而降低。但当长宽比达到 5 时,模式的空间分布被极大地局域化,此时不易受形变的影响,因此频率会随着磁场强度的增加而增加。通过对比三类结构,还发现长宽比为 4.5 时的共振频率高于长宽比为 4 时的共振频率,而且其矢量性也优于长宽比为 5 时的结构。因此,最终选择长宽比为 4.5 的 BP 进行灵敏度和线性度测试和拟合。

3.2 器件传感特性表征

选择长宽比为 4.5 的结构,探究其灵敏度、线性度、分辨率等参数。如图 8 所示,选取不同角度,分析磁场与谐振频率的关系,并对灵敏度曲线进行线性拟合。考虑到磁致伸缩系数的线性区间以及传感器的线性度,图 8 中仅选取 $40 \sim 100$ mT 的磁场强度范围为器件的量程。事实上,在仿真中,磁场强度在 200 mT 以上时,器件仍然有明显的响应。表 2 总结了 BP 结构在不同角度下的拟合参数,其中非线性误差是根据线性公式计算得到,即 $e_1 = \pm (\Delta_{\max} / y_{FS}) \times 100\%$,其中 Δ_{\max} 为实际特性曲线与拟合直线的最大偏差, y_{FS} 为满量程输出值。

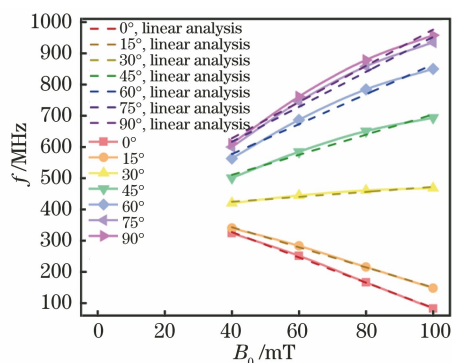


图 8 长宽比为 4.5 的结构共振频率随磁场强度的变化情况及其在 40~100 mT 区间的线性拟合

Fig. 8 Resonant frequency varying with magnetic field intensity for length-width ratio of 4.5 and its linear fitting in range of 40-100 mT

最终表征的灵敏度和非线性度随角度的变化情况如图 9 所示。如图 9 可见,随着角度的增加,灵敏

表 2 磁场强度为 40~100 mT 且长宽比为 4.5 的器件的线性拟合参数

Table 2 Linear fitting parameters of structures with magnetic field of 40-100 mT at length-width ratio of 4.5

Parameter	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Slope	-4.048	-3.221	0.799	3.225	4.788	5.595	5.796
Intercept	489.305	472.033	392.420	381.643	385.917	392.793	396.197
Residual	0.99819	0.99754	0.92117	0.97085	0.97301	0.92764	0.97202
Non-linear error / %	2.022	2.225	9.363	5.611	5.297	4.895	4.583

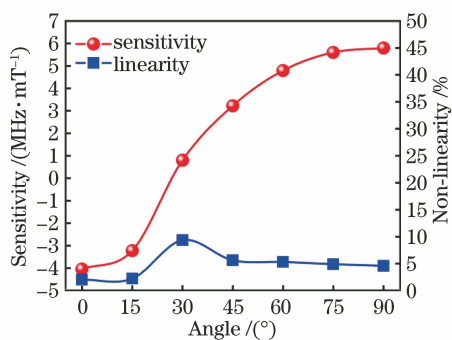


图 9 不同角度下的器件的灵敏度和非线性误差

Fig. 9 Sensitivity and nonlinear error of device under different angle

4 结 论

传统的 MEMS 传感器缩小到纳米量级时,晶格缺陷及表面效应导致其难以保持高精度矢量传感特性。利用超薄二维黑磷薄膜,设计了一种高灵敏度的纳光机电磁矢量传感器。首先,对 BP 谐振器的层数和长宽比进行了全面的探究。通过参数优化得到最合适的 BP 谐振结构大小为 $0.6 \mu\text{m} \times 0.134 \mu\text{m} \times 0.5 \text{nm}$ 。探讨了不同长宽比下及不同应力取向向下各种模态的空间分布时与应变方向相同

度逐渐增加。当角度从 0° 变为 90° 时,灵敏度也相应地从 -4.048 MHz/mT 增加到 5.796 MHz/mT 。非线性度基本保持在 10% 以内,但在角度为 30° 时有突变。这是由于角度为 30° 时标度因数最小,量程内的变量也最小,导致非线性误差明显增大。理论分辨率按照目前普通频谱 1 Hz 的探测精度计算,当灵敏度为 5.796 MHz/mT 时,最小分辨率也可以达到 0.17 nT ,这一指标对于 μm^2 量级的谐振尺寸而言已经极为可观。通过和基于洛伦兹力的谐振式 MEMS 磁场传感器对比^[4],发现这种黑磷 NOEMS 在精度相等、信号读取方式相似的前提下,可以将谐振频率提高 6 个数量级(从 100 Hz 量级提高到 100 MHz 量级),将核心结构的尺寸减小约 6 个数量级(mm^2 量级减小到 μm^2 量级),而且该器件还保持良好的矢量传感特性。

的模式局域效应,在大的长宽比下该效应尤为明显。基于 BP 的正交各向异性,研究了不同方向上频率随磁场的变化,发现磁致应力沿“扶手椅”方向的灵敏度最小为 -4.048 MHz/mT ,方向旋转到 90° 时灵敏度达到最大,即 5.796 MHz/mT ,这体现出良好的矢量性。最终,与洛伦兹力谐振式 MEMS 磁场传感器相比,所设计器件的谐振频率可提高 6 个数量级,但其尺寸可减小 6 个数量级,该研究从理论上为纳光机电矢量传感开辟了一条新的路径。

参 考 文 献

- [1] Xu L, Wang S, Jiang Z, et al. Programmable synchronization enhanced MEMS resonant accelerometer [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2020, 6: 63.
- [2] Chelnokov Y N. Inertial navigation in space using the regular quaternion equations of astrodynamics [J]. *Mechanics of Solids*, 2019, 54(2): 157-168.
- [3] Herrera-May A L, Aguilera-Cortés L A, García-Ramírez P J, et al. Resonant magnetic field sensors based on MEMS technology [J]. *Sensors*, 2009, 9 (10): 7785-7813.
- [4] Park B, Li M T, Liyanage S, et al. Lorentz force based resonant MEMS magnetic-field sensor with

- optical readout [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 241: 12-18.
- [5] Dolleman R J, Davidovikj D, Cartamil-Bueno S J, et al. Graphene squeeze-film pressure sensors [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 568-571.
- [6] 刘雨晴, 张嘉芮, 韩冬冬, 等. 激光加工石墨烯传感器和执行器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1502003.
Liu Y Q, Zhang J R, Han D D, et al. Recent progress in laser-processed graphene for sensors and actuators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1502003.
- [7] 陈招弟, 李纪超, 萧善霖, 等. 激光还原氧化石墨烯制备薄膜柔性电子器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111428.
Chen Z D, Li J C, Xiao S L, et al. Laser reduced graphene oxide for thin film flexible electronic devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111428.
- [8] Manzeli S, Dumcenco D, Migliato Marega G, et al. Self-sensing, tunable monolayer MoS₂ nanoelectromechanical resonators [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4831.
- [9] Fan X, Forsberg F, Smith A D, et al. Graphene ribbons with suspended masses as transducers in ultra-small nanoelectromechanical accelerometers[J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(9): 394-404.
- [10] Sun J, Muruganathan M, Mizuta H. Room temperature detection of individual molecular physisorption using suspended bilayer graphene[J]. *Science Advances*, 2016, 2(4): e1501518.
- [11] Verbiest G J, Kirchhof J N, Sonntag J, et al. Detecting ultrasound vibrations with graphene resonators[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 5132-5137.
- [12] 刘增勇, 曹鸿谦, 徐飞, 等. 石墨烯纳机电系统及其与光纤的集成研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110006.
Liu Z Y, Cao H Q, Xu F, et al. Graphene nanoelectromechanical system and its integration with optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110006.
- [13] Xiong Y F, Xu F. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2: 064001.
- [14] Midolo L, Schliesser A, Fiore A. Nano-opto-electromechanical systems [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(1): 11-18.
- [15] Wang Z H, Feng P X L. Design of black phosphorus 2D nanomechanical resonators by exploiting the intrinsic mechanical anisotropy [J]. *2D Materials*, 2015, 2(2): 021001.
- [16] Jiang X H, Qin S C, Cao Y, et al. Stable one-dimensional single crystalline black phosphorus nanowires for gas sensing [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(4): 3402-3409.
- [17] Ding H C, Zhang L, Tang Z R, et al. Black phosphorus quantum dots doped ZnO nanoparticles as efficient electrode materials for sensitive hydrogen peroxide detection [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 824: 161-168.
- [18] Zhao Y, Zhuge Z, Tang Y H, et al. Synthesis of a CuNP/chitosan/black phosphorus nanocomposite for non-enzymatic hydrogen peroxide sensing [J]. *The Analyst*, 2020, 145(22): 7260-7266.
- [19] Guo W L, Song H Z, Yan S C. Stable black phosphorus quantum dots for alkali PH sensor [J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 91-94.
- [20] 刘源, 黄友强, 赵英杰, 等. 掺杂型二维材料发光性能研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 1516014.
Liu Y, Huang Y Q, Zhao Y J, et al. Luminescence properties of doped two-dimensional materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(15): 1516014.
- [21] Amogh B S, Selamneni V, Bokka N, et al. Remarkably stable black phosphorus quantum dots-polyvinyl alcohol film as a water soluble breath sensor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(10): 5167-5172.
- [22] Abbas A N, Liu B L, Chen L, et al. Black phosphorus gas sensors[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(5): 5618-5624.
- [23] Wang Z H, Jia H, Zheng X Q, et al. Black phosphorus nanoelectromechanical resonators vibrating at very high frequencies [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(3): 877-884.
- [24] Islam A, van den Akker A, Feng P X L. Anisotropic thermal conductivity of suspended black phosphorus probed by opto-thermomechanical resonance spectromicroscopy[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7683-7691.
- [25] Jiang S W, Shi S, Wang X F. Nanomechanics and vibration analysis of graphene sheets via a 2D plate model[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(4): 045104.
- [26] Jiang S W, Gong X H, Guo X, et al. Potential application of graphene nanomechanical resonator as pressure sensor [J]. *Solid State Communications*, 2014, 193: 30-33.
- [27] Wei Q, Peng X H. Superior mechanical flexibility of phosphorene and few-layer black phosphorus [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251915.
- [28] Bian L X, Wen Y M, Li P, et al. Magnetostrictive stress induced frequency shift in resonator for magnetic field sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 247: 453-458.