

## 二维纳米材料磁性探测的双臂微悬臂梁设计

种 波, 陈博杨\*, 陈长城, 田东平

(西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 磁共振弱力探测技术能够对物质实现非破坏性的高精度结构信息探测, 在物理、生物、医学等领域有着非常重要的应用。该技术中, 超灵敏悬臂梁是实现弱力探测的核心组成之一。近年来, 二维纳米材料由于其奇特的物理特性得到了越来越多的关注。为实现对二维纳米材料磁性的探测, 基于单臂微悬臂梁模型, 利用差动放大的方法, 提出了双臂微悬臂梁的设计, 并分析了双臂微悬臂梁中上下球形磁探针内外部的磁场分布, 最后以单晶硅悬臂梁和钐钴合金磁球探针为例, 对该悬臂梁进行数值模拟, 发现该方案能够显著提高悬臂梁的探测灵敏度。

**关键词:** 磁共振技术; 弱力探测; 悬臂梁; 灵敏度

中图分类号: O4-34 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210198

## Design of double-arm micro-cantilever beam of two-dimensional nanomaterial magnetic detection

Chong Bo, Chen Boyang\*, Chen Changcheng, Tian Dongping

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Magnetic resonance weak force microscopy (MRWFM) can achieve non-destructive high-precision structural information detection of substances. This advantage makes MRWFM be widely applied in fields of physics, biology, medicine, and so on. The super-sensitive cantilever beam is one of core composition to realize weak force detection in this technology. In recent years, two-dimensional nanomaterials have attracted more and more attention due to their unique physical properties. In order to achieve the detection of the magnetism of two-dimensional nanomaterials, the design of double-arm micro-cantilever beams with differential amplification based on single arm micro-cantilever beam model was proposed. Then the magnetic field distributions inside and outside of the scan balls fastened on the double-arm micro-cantilever beams were analyzed. Finally, the numerical simulation of the cantilever beam was completed, taking the single-crystal silicon cantilever beams and CoSm magnetic ball probe as examples. It is found that the scheme can improve detection sensitivity of cantilever beam significantly.

**Key words:** magnetic resonance technology; weak force detection; cantilever beam; sensitivity

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-04-07

基金项目: 西安市科技计划高校人才服务企业项目 (2019217414GXRC010CG011-GXYD10.2)

作者简介: 种波, 男, 副教授, 博士, 主要从事量子信息和量子物理基础问题方面的研究。

通讯作者: 陈博杨, 男, 硕士生, 主要从事量子信息方面的研究。

## 0 引言

在研究物质结构时,人们需要对电子或质子所产生的弱力或弱磁进行灵敏探测,最常用的手段是磁共振技术<sup>[1]</sup>、扫描电子显微镜、磁共振弱力探测技术、单自旋量子探针技术<sup>[2]</sup>等。其中,磁共振弱力探测技术是美国科学家 Sidles 于 1991 年提出的,该技术将磁共振技术和扫描探针显微术相结合,利用磁共振技术使自旋发生反转,并用扫描磁探针感应作用力信号,在既不破坏样品的性能结构又不改变其动力学特性的条件下,实现对物质内部结构信息的高灵敏度和精度的探测。

将磁共振成像技术与扫描探针技术相结合的思想,设计出了磁共振力显微镜。

将磁共振技术和扫描探针显微术结合在一起,形成了磁共振弱力探测技术。该技术利用磁共振技术使自旋发生反转,并用扫描磁探针感应作用力信号,在既不破坏样品的性能结构又不改变其动力学特性的条件下,实现对物质内部结构信息的高灵敏度和精度的探测。

1992 年,首台磁共振力显微镜在 IBM Almaden 实验室问世。随着测量灵敏度的逐步提高,一些举世瞩目的研究成果相继出现,例如:2004 年,IBM 实验室的科学家利用携带钐钴合金磁探针的悬臂梁实现了石英样品的单电子自旋探测。2015 年,中国科学技术大学杜江峰组利用金刚石 NV 电子对探针实现了对大蛋白质分子成像的实验,同年,中国科学院强磁场中心与瑞士巴塞尔大学、美国威斯康辛大学合作利用动态悬臂梁磁探测技术实现对锰硅纳米线中的斯格明子态的探测<sup>[3]</sup>等。

磁共振弱力探测技术尽管已经获得了突飞猛进的发展,但是在弱力探测的实验中,仍然存在着一些困难<sup>[4]</sup>,比如:弹性系数小且几何尺寸小的高性能悬臂梁难以加工成型,悬臂梁所处空间环境的空气阻尼会严重影响梁的振动情况,使其振动频率偏离设定值等一些问題。

磁共振灵敏度探测技术研究的热点问题之一就是如何改进超灵敏悬臂梁,从而提高自旋信息探测灵敏度<sup>[5]</sup>。文中的研究正是基于这一目的,提出了双臂差动放大式悬臂梁的设计方案,希望能进一步提高探

测自旋信息的灵敏度。

## 1 双臂差动放大式悬臂梁的设计

磁共振弱力探测装置的主要组成部件包括磁探针、超灵敏悬臂梁、激光干涉仪以及振动隔离装置和低温装置等。其中,超灵敏悬臂梁与发生磁共振的样品磁化强度之间的作用力是磁共振弱力探测装置最根本的信号来源。常见的悬臂梁虽然形状各异,但是本质上都是由两部分构成,即底座和探针。探针一端是自由端,另一端固定在底座上。随着微纳米加工、微机电技术的日趋成熟,人们对于更加微小、更加灵敏的传感器的设计和制造技术也越来越成熟<sup>[4-5]</sup>。其中一种超灵敏悬臂梁就是以单晶硅为材质,通过半导体工艺加工而成的一种微机电器件。针对实验中体硅刻蚀单晶硅微悬臂梁埋氧层由于内部压应力的挤压作用发生变形破裂,可通过对埋氧层事先进行图形化,结合溶液置换,让其指定位置破裂以避免悬臂梁<sup>[4]</sup>。

由于具有结构和实验设备都较为简单、制作成本较低等优点,利用微臂悬臂梁探测是目前最常用的悬臂梁灵敏度探测方案之一<sup>[4-5]</sup>,其工作原理如图 1 所示。这种方案是将超灵敏微悬臂梁与压电陶瓷固定在一起,并在压电陶瓷上施加交流电信号。由于压电效应,压电陶瓷便会以外加电场的频率来回振动,进而通过压电陶瓷的振动带动微悬臂梁振动,从而实现对悬臂梁的振动激发。当悬臂梁一端的磁探针和样品自旋发生力的作用时,悬臂梁产生形变,其共振频率发生变化,因此就可以利用激光干涉或者多普勒频移的办法间接探测到来自样品的力信号。

但是,单臂微悬臂梁存在一个重要的缺点,频率响应测试需要额外的归一化处理。即当外加电信号在固定幅值下做频率扫描时,压电陶瓷在不同电信号频率下的振幅不同,测得的悬臂梁振动强度随频率的变化关系需要与压电陶瓷自身在相应频率下的振幅进行归一化运算,才能得到微悬臂梁的真正频率响应曲线。归一化过程需要额外的数据测量与数据处理,必将造成实验误差的增大,测量的灵敏度的降低。

另外,理论及实验表明:悬臂梁在高阶振动模式作用下会产生磁力噪声,并导致样品中自旋粒子不稳定,带来额外的自旋弛豫。为了解决这样的问题,B. Chui 等人提出携带质量块的悬臂梁结构<sup>[6]</sup>。通过在

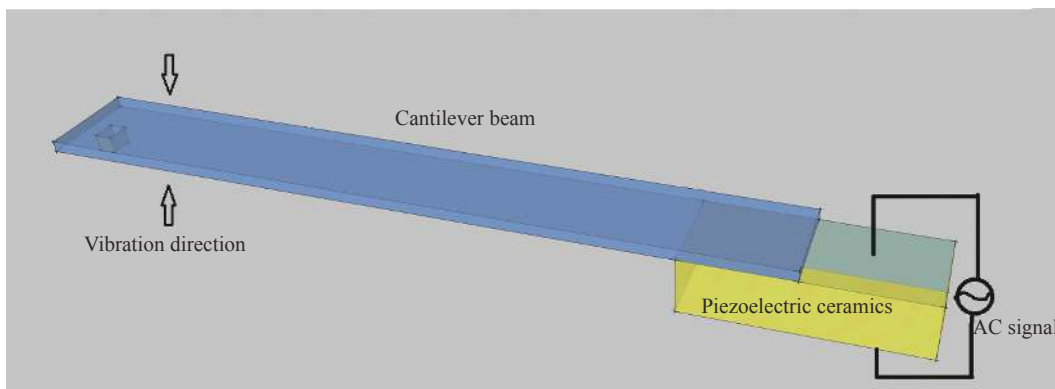


图 1 压电单臂悬臂梁原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of piezoelectric single arm cantilever beam

悬臂梁端头加上荷载,能够有效抑制高阶振动,降低高频噪声的影响,提高在探测过程中的自旋弛豫时间。

为了提高悬臂梁的探测灵敏度,在低温、振动隔离和低温装置系统下,借鉴差动放大的基本思想,笔

者课题组提出了一种双臂差动放大式悬臂梁的设计思路,具体为将两个完全相同的压电单臂悬臂梁组合起来,悬臂梁的一端固定,另一端分别粘有球形微磁体探针,样品置于两探针之间,其结构如图 2 所示。

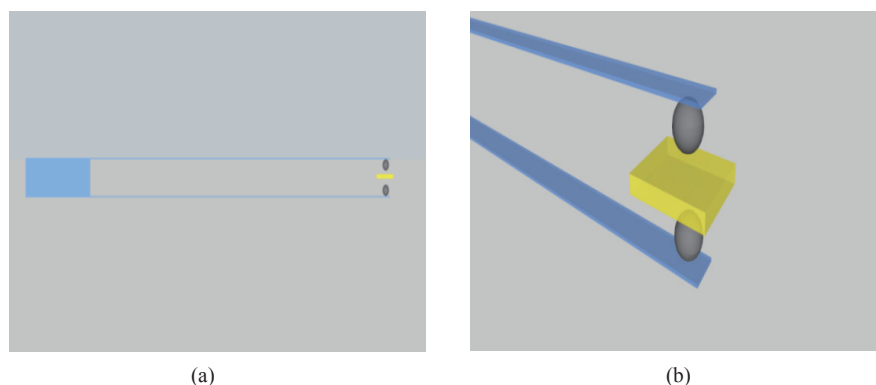


图 2 双臂差动放大式悬臂梁工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the working principle of double-arm differential amplification cantilever beam

当少量的自旋发生反转时,与上、下两个磁探针产生不相同的力的作用,因此上、下两个悬臂梁的振幅不等,通过激光放大分别探测两个梁的振动情况,得到各自的表征力大小的电信号,将这两组信号组合后输入差动放大电路进行放大运算,再用计算机进行分析处理,就可以得到样品中的自旋信息。与单臂梁相比,利用差分放大法设计的这种球形微磁体探针双臂式悬臂梁具有更适合的梯度场,探测到的信号更少,能够显著提高结构信息探测灵敏度和精度。

## 2 双臂差动放大式悬臂梁性能分析

用于自旋探测的超灵敏悬臂梁,其端头带有球形

微磁体作为探针,与样品中的自旋发生相互作用。对于球形磁探针,球内、外均无自由电流分布,设球外为真空,球内均匀磁化,设球形磁探针半径为 $R_0$ ,双臂差动放大式悬臂梁的球形磁探针中磁场分布满足如下方程:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi_{m1} = 0, R > R_0 \\ \nabla^2 \varphi_{m2} = 0, R < R_0 \\ \varphi_{m1}|_{R \rightarrow \infty} = 0 \\ \varphi_{m2}|_{R=0} < \infty \\ \varphi_{m1}|_S = \varphi_{m2}|_S \\ \mu_0 \frac{\partial \varphi_{m1}}{\partial n} \Big|_S = \mu_0 \left( \frac{\partial \varphi_{m2}}{\partial n} \Big|_S + \vec{M}_{OR} \right) \end{cases} \quad (1)$$

方程的通解为:

$$\begin{cases} \varphi_{m1} = \sum_n [a_n R^n + b_n R^{-(n+1)}] P_n(\cos\theta) \\ \varphi_{m2} = \sum_n [c_n R^n + d_n R^{-(n+1)}] P_n(\cos\theta) \end{cases} \quad (2)$$

对于球形磁探针外部的磁场,有:

$$\vec{H}_1 = -\left(\frac{\partial}{\partial R} \vec{e}_R + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{R \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi\right) \frac{R_0^3 M_0 \cos\theta}{3R^2} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{m}}{R^3} \right] \quad (3)$$

磁感应强度为:

$$\vec{B}_1 = \mu_0 \vec{H}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{R}) \vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{m}}{R^3} \right] \quad (4)$$

对于球形磁探针内部的磁场,有:

$$\vec{H}_2 = -\nabla \varphi_{m2} = -\left(\frac{\partial}{\partial R} \vec{e}_R + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \vec{e}_\theta + \frac{1}{R \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi\right) \cdot \frac{R M_0 \cos\theta}{3} = -\frac{1}{3} M_0 \vec{e}_z \quad (5)$$

磁感应强度为:

$$\vec{B}_2 = \mu_0 (\vec{H}_2 + \vec{M}_2) = \mu_0 \left( -\frac{1}{3} \vec{M}_0 + \vec{M}_0 \right) = \frac{2}{3} \mu_0 \vec{M}_0 \quad (6)$$

如图 3 建立的坐标系,以球形磁探针  $a$  的球心所在处为坐标原点,两探针球心之间的距离为  $d$ ,则在  $z$  轴上距离坐标原点为  $R$  处的磁感应强度  $B_z$  为  $B_a$  和  $B_b$  的矢量叠加场。由于:

$$\vec{B}_{az} = -\frac{4\mu_0 R_0^3 M_0}{3R^3} \vec{e}_z, \vec{B}_{bz} = \frac{2\mu_0}{3} \frac{R_0^3 M_0}{(d-R)^3} \vec{e}_z \quad (7)$$

则样品实际感受到的磁感应强度为:

$$\vec{B}_z = \vec{B}_{az} + \vec{B}_{bz} + \vec{B}_0 \quad (8)$$

以钐钴合金磁球作为磁探针,对双臂差动放大式悬臂梁的灵敏度进行数值模拟。根据参考文献 [5, 7],单晶硅悬臂梁的尺寸取为  $465 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ ,密度为  $\rho = 2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量为  $E = 168 \text{ GPa}$ ,则悬臂梁的有效质量为:

$$m_{can} = \frac{1}{4} \rho w l t = 1.354 \times 10^{-12} \text{ kg} \quad (9)$$

弹性系数为:

$$k = \frac{1}{4} E w \left(\frac{t}{l}\right)^3 = 5.221 \times 10^{-4} \text{ N/m} \quad (10)$$

悬臂梁的共振频率值为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{can}}} = 3 \text{ 125 Hz} \quad (11)$$

首先考虑无质量加载的情况,依据参考文献 [8],取品质因数  $Q = 23 \text{ 000}$ ,并假设阻尼不变,则悬臂梁的最大测力灵敏度为:

$$F_{\min} = t \left(\frac{w}{lQ}\right)^{1/2} (E\rho)^{1/4} (k_B T B)^{1/2} = 7.382 \text{ aN} \quad (12)$$

下面考虑有质量加载的情况,依据参考文献 [8],如果在悬臂梁的一端加载质量为  $\Delta m$ ,钐钴合金磁球探针质量取  $m_0 = 5.498 \times 10^{-13} \text{ kg}$ ,在离磁探针  $1 \mu\text{m}$  的地方,磁场梯度为  $\frac{\partial B}{\partial z} = 5.0 \times 10^3 \text{ T/m}$ ,则悬臂梁的共振频率变为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{7.561 \times (\Delta m + 5.498 \times 10^{-13}) \times 10^4 + \frac{1}{3 \text{ 125}^2}}} \quad (13)$$

如果  $\Delta m$  被加载在悬臂梁端头  $15.0 \mu\text{m}$  处,阻尼系数不变,悬臂梁的弹性系数取最大为  $k'_{\max} = 5.743 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ ,则悬臂梁能探测到的最小力为:

$$F_{\min}' = 6.527 \text{ aN} \quad (14)$$

通常,单电子自旋磁矩为  $9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  [8],若取外加磁场梯度为  $\frac{\partial B}{\partial z} = 5.0 \times 10^3 \text{ T/m}$  (实验上通常可以达到  $2.0 \times 10^4 \text{ T/m}$ ),那么单个电子作用在悬臂梁上的力为  $1.807 \text{ aN}$ ,则理论上悬臂梁最小能够测得 4 个电子自旋反转的信号,从而显著提高了探测灵敏度。

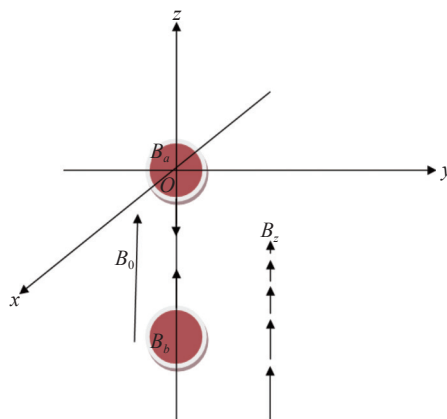


图 3  $z$  方向磁场强度分布示意图

Fig.3 Distribution diagram of magnetic field intensity in  $z$  direction

### 3 结论

提高悬臂梁的探测灵敏度是磁共振弱力探测技

术发展的主要方向之一。笔者结合单晶硅悬臂梁的动力学特性设计出一种双臂差动放大式悬臂梁,通过端头质量加载方法,在单次实验中同时探测得到两组实验数据,对其进行差动放大,进而提高悬臂梁的探测灵敏度。最后,以钐钴合金磁球作为磁探针,分析探针之间的磁场分布情况并进行数值模拟,发现利用双臂差动放大式悬臂梁理论上能够探测到至少 6.527 aN 的弱力,即 4 个自旋信号,从而提高了悬臂梁的探测灵敏度。这一研究成果对进一步改进磁共振弱力探测装置中悬臂梁的设计有重要参考意义。

#### 参考文献:

- [1] Zhang J S. Magnetic resonance imaging technology and its advantages [J]. *Medical Equipment*, 2021, 34(5): 184-185, 187. (in Chinese)
- [2] Wang Y N. Advances in fluorescent probes based on the “on-off-on” mechanism of quantum dots [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(10): 59-63. (in Chinese)
- [3] Mehlh A, Xue F, Liang D, et al. Stabilized skyrmion phase detected in mnsi nanowires by dynamic cantilever magnetometry [J]. *Nano Letters*, 2015, 15: 4839.
- [4] Cao G Y, Fu H. Magnetic force resonance microscope [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2011, 30(1): 81-90. (in Chinese)
- [5] Liu Y. Design, fabrication and characteristic research of highly sensitive cantilever beams[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [6] Chui B W, Hishinuma Y, Budakian R, et al. Mass-loaded cantilevers with suppressed higher-order modes for magnetic resonance force microscopy[C]//12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers (Cat. No. 03TH8664), 2003, 2: 1120-1123.
- [7] Rugar D, Budakian R, Mamin H J, et al. Single spin detection by magnetic resonance force microscopy [J]. *Nature*, 2004, 430: 329-332.
- [8] Yan M, Peng X L. Fundamentals of Magnetism and Magnetic Materials[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)