

基于金刚石色心自旋磁共振效应的微位移测量方法

王磊 郭浩 陈宇雷 伍大锦 赵锐 刘文耀 李春明 夏美晶 赵彬彬 朱强 唐军 刘俊

A method of measuring micro-displacement based on spin magnetic resonance effect of diamond color center

Wang Lei Guo Hao Chen Yu-Lei Wu Da-Jin Zhao Rui Liu Wen-Yao Li Chun-Ming Xia Mei-Jing Zhao Bin-Bin Zhu Qiang Tang Jun Liu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 047601 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171914

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171914>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于飞秒激光模间拍频法的大尺寸测距方法

Large-scale absolute distance measurement using inter-mode beat of a femtosecond laser

物理学报.2016, 65(8): 080602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080602>

光学频率梳啁啾干涉实现绝对距离测量

Absolute distance ranging by means of chirped pulse interferometry

物理学报.2016, 65(2): 020601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020601>

基于电子顺磁共振的锌卟啉敏化 TiO_2 光催化性机理的研究

Study on the photocatalytic mechanism of TiO_2 sensitized by zinc porphyrin

物理学报.2015, 64(13): 137601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.137601>

光学频率梳基于光谱干涉实现绝对距离测量

Spectral interferometry based absolute distance measurement using frequency comb

物理学报.2015, 64(2): 020601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020601>

脉冲强磁场高频电子自旋共振装置的研制

Development of high-magnetic-field, high-frequency electronic spin resonance system

物理学报.2012, 61(10): 107601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.107601>

基于金刚石色心自旋磁共振效应的微位移测量方法*

王磊¹⁾²⁾ 郭浩¹⁾²⁾ 陈宇雷¹⁾²⁾ 伍大锦¹⁾²⁾ 赵锐²⁾ 刘文耀¹⁾²⁾
李春明¹⁾²⁾ 夏美晶¹⁾²⁾ 赵彬彬¹⁾²⁾ 朱强¹⁾²⁾ 唐军^{1)2)†} 刘俊^{1)2)‡}

1) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

2) (中北大学, 仪器与电子学院, 太原 030051)

(2017年8月28日收到; 2017年12月14日收到修改稿)

基于压电陶瓷精密微位移系统的扫描探测技术是目前精密测量仪器进行微纳区域/结构性能测试的核心系统, 但压电陶瓷材料存在迟滞、非线性问题, 限制了对微位移分辨能力的提升. 本文以金刚石氮空位色心为敏感单元, 利用电子自旋效应对磁场强度的高分辨敏感机理, 结合永磁体周围不同位置对应的磁场强度变化关系, 提出了一种基于金刚石氮空位色心电子自旋敏感机理的微位移检测方法. 通过建立电子自旋效应与微位移的关联模型, 搭建了相应的微位移测量系统. 经实验验证, 该系统对微位移测试的灵敏度为16.67 V/mm, 检测分辨率达到60 nm, 实现了对微位移的高分辨率测量. 并通过理论分析, 该系统的微位移测量分辨率可进一步提升至亚纳米级水平, 为新型微位移测量技术提供了发展方向和研究思路.

关键词: 金刚石氮空位色心, 微位移测量, 自旋磁共振, 精密测量

PACS: 76.30.-v, 76.30.Mi, 06.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.67.20171914

1 引言

原子力显微系统、扫描探针显微系统等精密测量仪器通过其纳米级扫描探针装置, 能够实现纳米操控和对纳米区域、纳米结构的表面探测^[1-3]. 随着纳米科技、精密探测等技术的不断发展, 基于高分辨率、高精度微位移测量系统的纳米级扫描探针技术在表面科学、材料科学、生命科学等各个领域发挥着越来越重要的作用^[4-7].

目前, 高分辨率、高精度微位移测量系统主要采用压电陶瓷、微机械结构应力反馈等方法来实现探针系统微位移的精密测量与控制等^[8]. Liu和Li^[9]采用压电陶瓷结构的微驱动特性, 利用现场可编程门阵列电压反馈控制方法, 研制了高分辨率

的微位移测量系统, 分辨率达到30 nm. 但由于压电陶瓷迟滞、蠕变、非线性等问题, 限制了分辨率的提高. Ito等^[10]利用Cr-N薄膜结构的高灵敏度应力敏感特性, 结合微机械结构微位移作用下的应力反馈检测, 实现了对20 nm分辨率的微位移检测. Gather等^[11]采用微机械弹性共振结构在微位移作用下产生的应力来反馈检测微位移大小, 实现了对2 nm大小的微位移高分辨率检测. 然而受限于微机械结构的加工工艺复杂、工艺误差大、重复性差等问题, 使其测量分辨率难以进一步提升. 因此, 需要新型技术来打破传统微位移测量的发展瓶颈.

近年来, 以金刚石氮空位色心体系为核心的物理量探测, 以其原子自旋和电子自旋效应作为物理

* 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目 (批准号: 51727808)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51635011)、山西省青年拔尖人才计划 (批准号: 2016002) 和山西省“1331工程”重点学科建设项目计划经费资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tangjun@nuc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liuj@nuc.edu.cn

量检测的基本原理,成为精密测量技术发展的新方向^[12-14].目前,基于金刚石氮空位色心的原子自旋和电子自旋敏感机理的磁强计已经实现了pT量级的磁场检测^[15,16].以此磁强计来对磁梯度场中不同位置磁场强度的检测,并通过磁场强度的变化反应位置的改变,由此可以实现对微位移的高分辨率测量.

本文利用金刚石氮空位色心自旋结构对磁梯度场的高精度敏感机理,结合永磁体周围不同位置对应的磁场强度变化关系,提出了一种基于金刚石氮空位色心的电子自旋敏感机理的微位移检测方法,并搭建了相应的微位移测量系统.初步探索了该系统对微位移分辨率,为金刚石氮空位色心在微位移传感领域的研究提供实验基础.

2 实 验

2.1 微位移测量原理

金刚石氮空位(NV)色心是由氮原子取代金刚石晶格中的一个碳原子与相邻的碳空位组成,具有 C_{3v} 对称,对称轴为由氮原子和空穴形成的晶轴,称为NV轴,NV轴方向与金刚石[111]晶相方向一致^[17,18].是一种典型的电子自旋结构.金刚石NV

色心在磁场的作用下,其电子自旋能级发生塞曼分裂,具有超高的磁场分辨能力^[19,20],基态能级结构如图1(a)所示.利用金刚石NV色心的电子自旋对磁场的分辨特性,能够实现对磁梯度场的分辨,进而实现对磁梯度场对应的位置测量,以此实现对微位移的检测,其原理如图1所示.

金刚石NV色心的能级基态是自旋三重态,如图1(a)所示,由于两个不成对电子的磁偶极子相互作用, $m_s = 0$ 态和 $m_s = \pm 1$ 态之间存在 $D = 2.87$ GHz的零场分裂^[21].当无外界磁场的影响时, $m_s = \pm 1$ 处于简并态($E = 0$),电子自旋共振(ESR)光谱只有一个共振谷的出现;当受到外界环境的磁场作用时, $m_s = +1$ 和 $m_s = -1$ 发生退简并,ESR光谱将会出现两个共振谷^[22].当外界所施加磁场方向沿金刚石NV色心轴线方向时,共振频率 ω 可由(1)式表示^[16,23]:

$$\omega = D \pm g\mu_B B, \quad (1)$$

其中 B 为磁感应强度, μ_B 是玻尔磁子($\mu_B = 1.4$ MHz/Gauss), g 是朗德因子($g = 2$).塞曼分裂频率 $\Delta\omega$ 与磁感应强度 B 关系可以表示为

$$\Delta\omega = g\mu_B B. \quad (2)$$

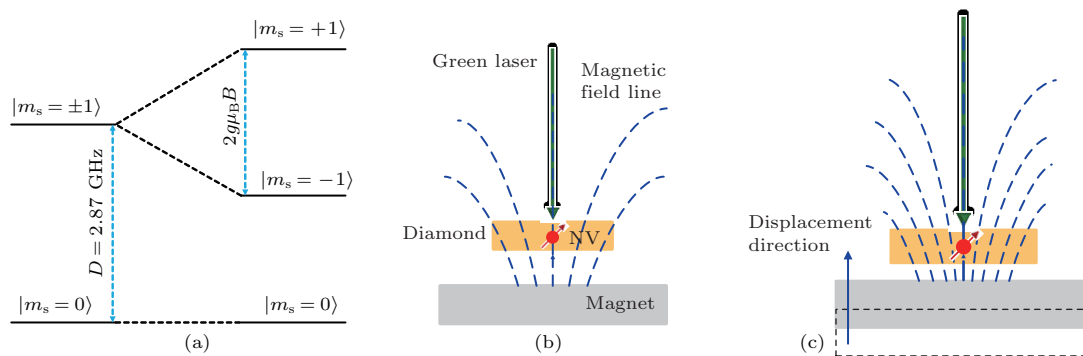


图1 (a) 能级图; (b), (c) 位移测量原理图

Fig. 1. (a) Energy level diagram; (b) and (c) the principle of displacement measurement.

永磁体、磁线圈等常规磁体结构周围磁场成梯度场分布^[24].文中圆柱形永磁体的材料为N35烧结钕铁硼,沿轴线方向均匀磁化,其磁化强度 M 为0.1229 T,尺寸半径 $r = 8 \times 10^{-3}$ m,高度 $h = 1 \times 10^{-3}$ m.以圆柱形永磁体下表面圆心为原

点建立坐标系,如图2(a)所示.在圆柱中心轴线(z 轴)上的点,由于对称性只受到 z 轴方向的磁场强度分量的作用,其他方向相互抵消.对 z 轴上的任意一点P的磁场强度 H 可以由 z 轴方向的磁场强度分量 H_z 表示^[25]:

$$H_z = \frac{M}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{r[r - \rho \cos(\varphi - \varphi_0)]}{[\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2]^{3/2}} d\varphi_0 dz_0. \quad (3)$$

其中 (ρ, φ, z) 为任意一点 P 点的柱坐标表示, z_0 为圆柱厚度, φ_0 为圆柱侧表面上从正 z 轴来看自 x 轴逆时针旋转到指定位置的角度。

实验中, 应用 Matlab 软件对磁场强度分量 (3) 式进行仿真分析, 结果如图 2(b) 所示。由永磁体表

面沿轴线远离, 磁场强度逐渐减弱。

由于是均匀磁化, 则 $B = H/\mu_0$, μ_0 为真空磁导率其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。由 (2) 和 (3) 式可得永磁体轴线上塞曼分裂与微位移之间的关系:

$$\Delta\omega = g\mu_B\mu_0 \frac{M}{4\pi} \int_0^h \int_0^{2\pi} \frac{r[r - \rho \cos(\varphi - \varphi_0)]}{[\rho^2 + r^2 - 2\rho r \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2]^{3/2}} d\varphi_0 dz_0. \quad (4)$$

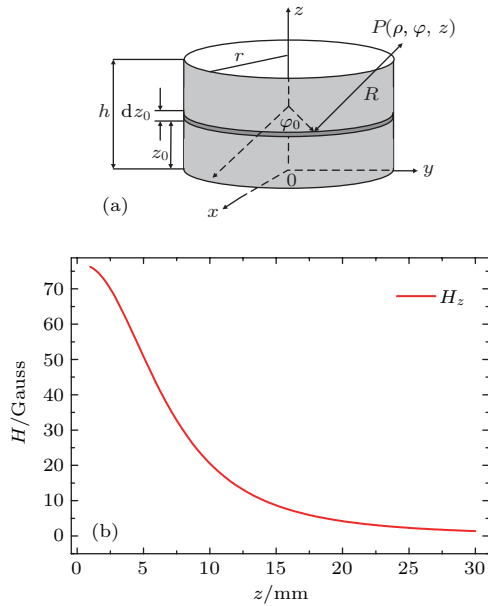


图 2 (a) 永磁体示意图; (b) z 轴上的磁场强度仿真图
Fig. 2. (a) Schematic diagram of permanent magnet; (b) magnetic field intensity simulation graph on z axis.

2.2 微位移测量系统

测试系统示意图见图 3, 测试中信号源发出信号, 并分成两路, 其中一路信号进入微波源, 对所发出的微波信号进行调制; 另一路作为参考信号进入锁相放大器。微波源产生的微波信号通过微波天线作用在金刚石上, 用于诱导金刚石 NV 色

心的自旋翻转。激光器发出 532 nm 波长的激光, 经过二向色镜 (反射波长 380—550 nm, 透射波长 584—700 nm) 反射, 并通过物镜将激光聚焦在金刚石上, 使金刚石 NV 色心发生极化, 并发出荧光。金刚石 NV 色心在微波和激光同时作用下, 发出带有调制信息的 ESR 荧光信号, 由物镜收集, 透过二向色镜, 经过平凸镜聚焦以及带通滤光片滤除 550—750 nm 波段以外的光, 最后进入光电探测器采集。荧光信号分两路输出, 一路直接用于观测 ESR 荧光信号; 另一路通过锁相放大器得到对应的解调曲线。图中位移 z 方向为沿着永磁体轴线方向, 且与金刚石 [111] 晶相同向。位移测试中通过高精度位移调节台实现金刚石与永磁体之间的距离调节, 位移调节台的最小分辨率为 0.01 mm。图中虚线框内区域处在磁屏蔽环境下。

本文在实验中应用到的金刚石样品采购于 Element 6 公司。该金刚石为典型的 Ib 型单晶金刚石, 尺寸为 $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 其抛光面为 (100) 晶面。

为了屏蔽地磁场以及周围环境磁场的干扰, 实验均在由北京住信通光电技术有限公司生产的 CPBT-W7 型磁屏蔽系统内进行, 其屏蔽剩磁优于 0.1 nT。

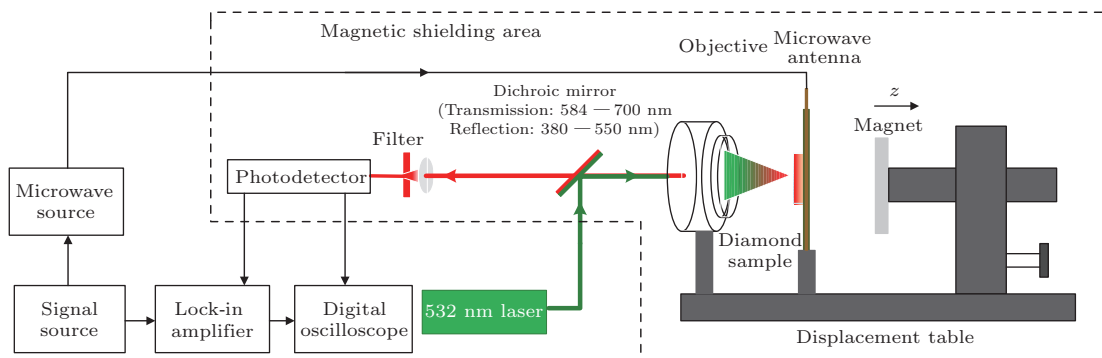


图 3 测试系统示意图
Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup.

3 测试与分析

3.1 永磁体磁梯度场测试

在进行位移测试前,应用青岛中宇环泰磁电科技有限公司生产的Model931型高斯计对永磁体磁场进行了测试.为了获得较大的磁场强度梯度,根据图2(b)的仿真结果,对沿永磁体轴线方向距离表面10 mm内的一段区域进行测试,并标定其线性程度.测试中,通过位移调节台将高斯计探头沿永磁体轴线移动,记录所在位置 z 与高斯计所测试的磁场强度 H ,测试结果如图4所示.

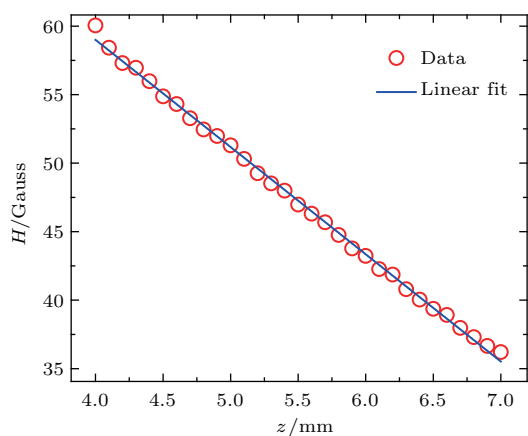


图4 实测沿 z 轴的磁场强度变化

Fig. 4. Magnetic field intensity along the z axis is measured.

通过直线拟合分析,可知在沿永磁体轴线方向4—7 mm范围内的磁场强度梯度为 $dH/dz = -7.77$ Gauss/mm,线性相关系数为0.99725,所以可以将此范围磁场强度视为线性变化.沿轴线上某一位置 z 与磁场强度 H 的关系拟合直线方程为:

$$H = -7.77z + 89.92. \quad (5)$$

3.2 微位移测试与分析

为了建立塞曼分裂与位移之间的关系,将金刚石固定在高精度位移调节台上,并将永磁体固定在高精度位移调节平台的滑杆上.通过位移调节台调节永磁体到金刚石的距离,调节范围在测试磁场线性区域内,间隔0.1 mm记录位置 z 与对应的ESR荧光信号塞曼分裂频率,结果如图5(a)所示.通过直线拟合,得塞曼分裂与微位移的关联关系 $d(\Delta\omega)/dz = -21.67$ MHz/mm,线性相关系数为0.99787,塞曼分裂频率随位置呈线性变化.

图5(b)为在测试磁场线性区内、位移间隔0.5 mm采集的ESR荧光光谱,图中横坐标为微波的扫频范围.根据(5)式可知,不同位置 z 所对应的磁场强度,图5(b)中的插图为对应位置的磁场强度与ESR塞曼分裂关系图.谱线由位置a到位置e随着磁感应强度逐渐减小,引起ESR的塞曼分裂频率减小,通过直线拟合得到的塞曼分裂频率与磁场强度之间关系 $d(\Delta\omega)/dH = 2.79$ MHz/Gauss.

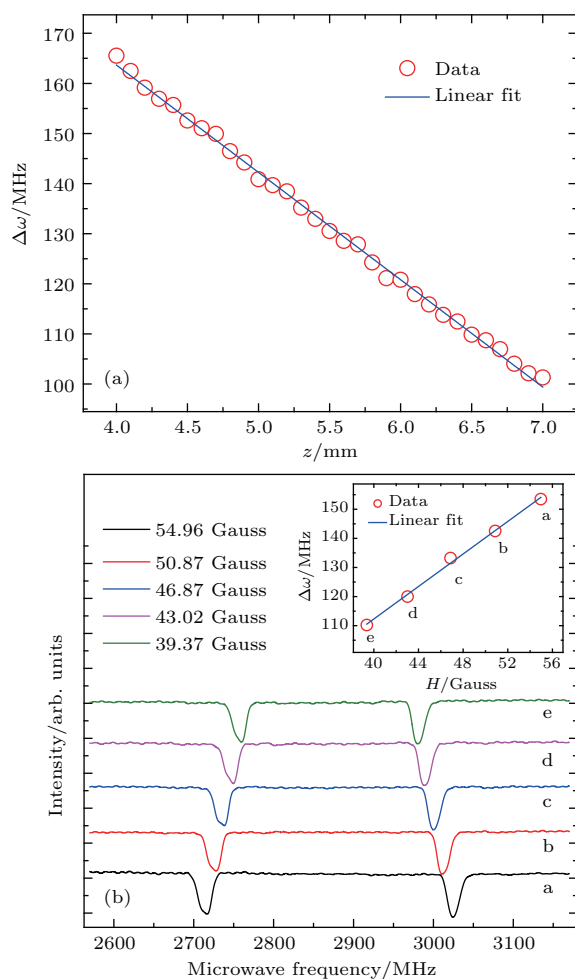


图5 (a) z 轴上塞曼分裂频率随位置的变化; (b) 不同磁场强度下ESR荧光光谱,插图为磁场强度与塞曼分裂频率关系的线性拟合,近似为2.79 MHz/Gauss

Fig. 5. (a) Zeeman splitting corresponding to various positions on z axis; (b) ESR fluorescence spectra under different magnetic field intensity, the insert graph is the linear fitting between Zeeman splitting and magnetic field intensity, the value is about 2.79 MHz/Gauss.

沿 z 轴正方向,在距离永磁体下表面5.5 mm(图5中位置c)处的磁场强度下,ESR荧光光谱标准化曲线的右侧共振谷如图6(a)中曲线a所示,共振频率 $f_{\text{res}} = 3000.56$ MHz,曲线半高全宽

FWHM = 15.24 MHz, 由塞曼分裂与微位移的关联关系 $d(\Delta\omega)/dz = -21.67 \text{ MHz/mm}$ 可得测试量程为 0.70 mm.

通过外部信号源对微波信号施加调制频率 25.8 kHz、调制幅值 1.5 V 的调制信号, 同时通过锁相放大器对曲线 a 的荧光信号进行解调, 得到的解调曲线如图 6(a) 中曲线 b 所示. 由解调曲线 b 可以得出, 在对应的荧光曲线半高全宽范围内, 解调曲线的斜率 α 为 0.74 V/MHz. 根据斜率 α 的值, 塞

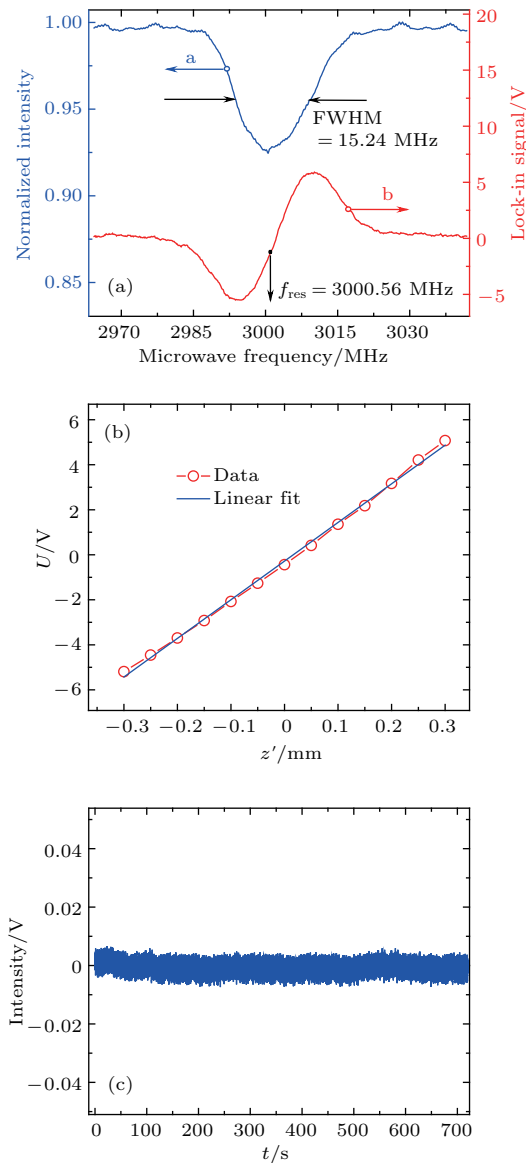


图6 (a) 上侧曲线为 ESR 荧光信号右侧的共振谷, 下侧曲线为锁相放大器输出曲线; (b) 电压位移特性曲线; (c) 系统输出噪声波形

Fig. 6. (a) Electron spin signal (curve a) and its corresponding lock-in amplifier output (curve b); (b) relation between output voltage and displacement; (c) noise signal of system output.

曼分裂频率随位置的变化可以通过电压上的变化表示, 即 $U = \alpha\Delta\omega(z)$. 以图 5 中位置 c 作为位移传感测试的原点, 用 z' 轴替代 z 轴, 在 $\pm 0.35 \text{ mm}$ 量程范围内进行测试. 通过对系统位移调节, 记录 3000.56 MHz 处对应锁相放大器输出信号的电压值, 得到位移与电压之间的关系曲线如图 6(b) 所示. 对其数据进行直线拟合, 得到其灵敏度为 16.67 V/mm, 线性相关系数为 0.99796.

在位移原点处, 将微波源设置为 3000.56 MHz 定频输出, 零位移量输入下, 记录光电探测器输出的光强信号, 通过去基线得到噪声波形, 如图 6(c) 所示. 对该噪声信号波形数据进行分析, 计算得系统噪声的标准偏差为 1 mV, 由测试灵敏度可得位移测试系统分辨率为 0.06 μm .

本文利用金刚石 NV 色心塞曼分裂磁共振效应实现了对微位移的测量, 测试系统的精度实现了 60 nm 的分辨, 从实验中可以得到, 该方法的测量精度由金刚石 NV 色心磁敏感测试分辨水平、磁体梯度场灵敏度以及电路系统对微弱电压信号的分辨水平决定. 实验中采用了沿磁体轴向距离 4—7 mm 范围内进行微位移系统搭建与测试, 磁梯度场为 7.77 Gauss/mm, 由磁体磁梯度场分布理论可知, 距磁体表面越近, 磁梯度场越大, 因此, 当微位移测量沿磁体轴向距离缩小到微米范围内, 通过理论计算可以进一步提高微位移测量分辨率, 有望能够达到亚纳米级水平.

4 结 论

本文利用电子自旋效应对磁梯度场的高精度敏感机理, 结合磁梯度场与微位移之间的关系, 研究了基于金刚石氮空位色心的电子自旋敏感磁机理的微位移测量方法. 实验中首先通过建立电子自旋磁共振与微位移之间的关系, 搭建了相应的微位移测量系统, 该系统对微位移的测量灵敏度为 16.67 V/mm, 分辨率达到 60 nm, 并进一步分析该微位移测量方法的测量分辨率可达到更高量级. 因此基于金刚石色心自旋磁共振效应的微位移测量方法在原子力显微系统、扫描探针系统等超精密扫描和控制技术领域有广泛的应用前景. 该方法分辨率高, 且系统简易、成本低, 为超高分辨率微位移测量系统提供了新的研究思路.

参考文献

- [1] Dufrene Y F, Ando T, Garcia R, Alsteens D, Martinez-Martin D, Engel A, Gerber C Muller D J 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 295
- [2] Maroufi M, Bazaei A, Moheimani S O R 2015 *IEEE T. Contr. Sys. T.* **23** 504
- [3] Swart I, Liljeroth P, Vanmaekelbergh D 2016 *Chem. Rev.* **116** 11181
- [4] Jiang C S, Repins I L, Beal C, Moutinho H R, Ramanathan K, Al-Jassim M M 2015 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **132** 342
- [5] Braunsman C, Proksch R, Revenko I, Schaffer T E 2014 *Polymer* **55** 219
- [6] Voss A, Stark R W, Dietz C 2014 *Macromolecules* **47** 5236
- [7] An P, Guo H, Chen M, Zhao M M, Yang J T, Liu J, Xue C Y, Tang J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 237306 (in Chinese) [安萍, 郭浩, 陈萌, 赵苗苗, 杨江涛, 刘俊, 薛晨阳, 唐军 2014 物理学报 **63** 237306]
- [8] Parali L, Pechousek J, Sabikoglu L, Novak P, Navarik J, Vujtek M 2016 *Optik* **127** 84
- [9] Liu Y T, Li B J 2016 *Precis. Eng.* **46** 118
- [10] Peng Y X, Ito S, Shimizu Y, Azuma T, Gao W, Niwa E 2014 *Sensor Actuat. A: Phys.* **211** 89
- [11] Kronenberg N M, Liehm P, Steude A, Knipper J A, Borger J G, Scarcelli G, Franze K, Powis S J, Gather M C 2017 *Nat. Cell Biol.* **19** 864
- [12] Maletinsky P, Hong S, Grinolds M S, Hausmann B, Lukin M D, Walsworth R L, Loncar M, Yacoby A 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 320
- [13] Mamin H J, Kim M, Sherwood M H, Rettner C T, Ohno K, Awschalom D D, Rugar D 2013 *Science* **339** 557
- [14] Cai J, Jelezko F, Plenio M B 2014 *Nat. Commun.* **5** 4065
- [15] Le S D, Pham L M, Bar G N, Belthangady C, Lukin M D, Yacoby A, Walsworth R L 2012 *Phys. Rev. B* **85** 121202
- [16] Clevenson H, Trusheim M E, Teale C, Schroder T, Braje D, Englund D 2015 *Nat. Phys.* **11** 393
- [17] Maertz B J, Wijnheijmer A P, Fuchs G D, Nowakowski M E, Awschalom D D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 125
- [18] Guo H, Chen Y L, Wu D J, Zhao R, Tang J, Ma Z M, Xue C Y, Zhang W D, Liu J 2017 *Opt. Lett.* **43** 403
- [19] Jensen K, Leefer N, Jarmola A, Dumeige Y, Acosta V M, Kehayias P, Patton B, Budker D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 160802
- [20] Liu D Q, Chang Y C, Liu G Q, Pan X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164208 (in Chinese) [刘东奇, 常艳春, 刘刚钦, 潘新宇 2013 物理学报 **62** 164208]
- [21] Lai N D, Zheng D W, Jelezko F, Treussart F, Roch J F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 191
- [22] Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R, Al-Homud M, Tisler J, Shin C, Kim C, Wojcik A, Hemmer P R, Krueger A, Hanke T, Leitenstorfer A, Bratschitsch R, Jelezko F, Wrachtrup J 2008 *Nature* **455** 648
- [23] Matsuzaki Y, Shimooka T, Tanaka H, Tokura Y, Semba K, Mizuoch N 2016 *Phys. Rev. A* **94** 052330
- [24] Ma J, Yang W M, Li J W, Wang M, Chen S L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137401 (in Chinese) [马俊, 杨万民, 李佳伟, 王妙, 陈森林 2012 物理学报 **61** 137401]
- [25] Wang R K, Zuo H F, Lü M 2011 *Aero. Compu. Tech.* **41** 19 (in Chinese) [王瑞凯, 左洪福, 吕萌 2011 航空计算技术 **41** 19]

A method of measuring micro-displacement based on spin magnetic resonance effect of diamond color center*

Wang Lei¹⁾²⁾ Guo Hao¹⁾²⁾ Chen Yu-Lei¹⁾²⁾ Wu Da-Jin¹⁾²⁾ Zhao Rui²⁾ Liu Wen-Yao¹⁾²⁾
 Li Chun-Ming¹⁾²⁾ Xia Mei-Jing¹⁾²⁾ Zhao Bin-Bin¹⁾²⁾ Zhu Qiang¹⁾²⁾
 Tang Jun^{1)2)†} Liu Jun^{1)2)‡}

1) (Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

2) (School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 28 August 2017; revised manuscript received 14 December 2017)

Abstract

As one of the excellent piezoelectric materials, piezoelectric ceramic has been widely used to develop a highly precise displacement measurement system, which is the key part of the scanning probe system of the high-precision measuring instrument. Based on the high-precision scanning probe system, the micro/nano structures can be easily and accurately detected by the instrument system. However, due to the limitations caused by the character of hysteresis and nonlinearity, it is difficult to further improve the precision of highly precise displacement measurement system. In this work, we present a novel method to develop the highly precise displacement measurement system based on the quantum spin effect. The nitrogen vacancy (NV) color center of single crystal diamond as a sensitive element senses the change of the micro-displacement. Based on the electron spin magnetic resonance effect of diamond nitrogen vacancy color center, the variation of the magnetic field generated from the magnetic steel can be detected with high precision by the electron spin. The relative relation between the displacement and the magnetic gradient field can be used to establish the correlation model between the displacement and the electron spin resonance peak. In the experiment, a corresponding micro-displacement measurement system is established based on the cylindrical permanent magnet, according to the correlation model between the electron spin resonance effect and micro-displacement. The linear region of magnetic field gradient is designed to detect the micro-displacement. Firstly, the intensity distribution of magnetic field gradient is measured by the gauss meter. As the measurement results show, the gradient value is -7.77 Gauss/mm along the core axis of cylindrical permanent magnet, and the intensity of magnetic field gradient distribution region is linear in the millimeter range. Meanwhile, the electron spin magnetic resonance peak of diamond nitrogen vacancy color center is achieved by the optically detected magnetic resonance technology. The electron spin magnetic resonance peak is approximately 2.79 MHz/Gauss in the magnetic field achieved by the fluorescence spectrum of diamond nitrogen vacancy color center, attributed to the relation model between Zeeman splitting effect and magnetic field.

In the experiment, the electron spin magnetic resonance signal of diamond nitrogen vacancy color center is locked-in by the demodulation method to achieve the change of micro-displacement. As the results show, the sensitivity is

* Project supported by the National Major Scientific Instrument Research and Manufacture Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51727808), the Key Fund Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51635011), the Outstanding Youth Talents Program of Shanxi Province, China (Grant No. 2016002), and the Shanxi "1331Project" Key Subjects Construction, China.

† Corresponding author. E-mail: tangjun@nuc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liuj@nuc.edu.cn

about 16.67 V/mm at the corresponding demodulation frequency of 3000.56 MHz. By the calculation, the resolution of micro-displacement measurement system is about 60 nm based on our method. It proves out a high precision and well reliability method to detect the micro-displacement. By the further theoretical calculation, based on the electron spin effect, the detection resolution of our method can be enhanced up to sub-nanometer scale by reducing the distance between the NV color center and the magnet. It presents a new research direction and field for the micro-displacement detection system.

Keywords: diamond nitrogen vacancy color center, micro-displacement measurement, spin magnetic resonance, precision measurement

PACS: 76.30.-v, 76.30.Mi, 06.30.Bp

DOI: [10.7498/aps.67.20171914](https://doi.org/10.7498/aps.67.20171914)