

基于金刚石 NV 色心的纳米尺度磁场测量和成像技术

王成杰 石发展 王鹏飞 段昌奎 杜江峰

Nanoscale magnetic field sensing and imaging based on nitrogen-vacancy center in diamond

Wang Cheng-Jie Shi Fa-Zhan Wang Peng-Fei Duan Chang-Kui Du Jiang-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 130701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180243

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180243>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[共振线极化光实现原子矢量磁力仪的理论研究](#)

Theory of atomic vector magnetometer using linearly polarized resonant light

物理学报.2018, 67(6): 060701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172108>

[抽运-检测型非线性磁光旋转铷原子磁力仪的研究](#)

Rubidium atomic magnetometer based on pump-probe nonlinear magneto-optical rotation

物理学报.2017, 66(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.160701>

[极化检测型铷原子磁力仪的研究](#)

Research on an pump-probe rubidium magnetometer

物理学报.2016, 65(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.210702>

[四面体磁梯度张量系统的载体磁干扰补偿方法](#)

A vehicle magnetic noise compensation method for the tetrahedron magnetic gradiometer

物理学报.2014, 63(11): 110702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110702>

[磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法研究](#)

Research on the asphericity error elimination of the invariant of magnetic gradient tensor

物理学报.2015, 64(19): 190701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190701>

专题: 磁斯格明子

基于金刚石NV色心的纳米尺度磁场测量和成像技术*

王成杰¹⁾³⁾⁴⁾ 石发展¹⁾²⁾³⁾⁵⁾ 王鹏飞^{1)2)3)5)†} 段昌奎¹⁾³⁾⁴⁾
杜江峰¹⁾²⁾³⁾⁵⁾

1)(中国科学技术大学, 中国科学院微观磁共振重点实验室, 合肥 230026)

2)(中国科学技术大学, 合肥微尺度国家实验室, 合肥 230026)

3)(中国科学技术大学, 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026)

4)(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

5)(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2018年1月31日收到; 2018年4月13日收到修改稿)

纳米级分辨率的磁场测量和成像是磁学中的一种重要研究手段. 金刚石中的单个氮-空位点缺陷电子自旋作为一种量子传感器, 具有灵敏度高、原子级别尺寸、可工作在室温等诸多优势, 灵敏度可以达到单核自旋级别, 空间分辨率达到亚纳米. 将这种磁测量技术与扫描成像技术结合, 能够实现高灵敏度和高分辨率的磁场成像, 定量地重构出杂散场. 这种新型的磁成像技术可以给出磁学中多种重要的研究对象如磁畴壁、反铁磁序、磁性斯格明子的结构信息. 随着技术的发展, 基于氮-空位点缺陷的磁成像技术有望成为磁性材料研究的重要手段.

关键词: NV色心, 量子测量, 磁测量, 磁成像

PACS: 07.55.Ge, 07.57.Pt, 52.70.Gw, 07.79.-v

DOI: 10.7498/aps.67.20180243

1 引言

磁性测量无论是在包括物理、化学、生物等基础科学领域还是工业生产中都有广泛而且重要的作用. 针对不同的需求各种不同的磁测量方案被提了出来, 其中, 近些年发展起来的基于金刚石NV色心(nitrogen-vacancy color center, NV center)的磁测量技术相对于传统的磁测量技术, 例如霍尔效应传感器、超导量子干涉仪、磁力显微镜等具有诸多优势: 工作温度覆盖亚开尔文到600开尔文, 空间分辨率能够达到亚纳米, 灵敏度达到纳特斯拉级

别, 同时对样品本身磁场没有任何侵扰. 另一方面, 作为一个传感器, NV色心由于其原子尺度的大小, 能够靠近待测样品到纳米量级, 结合其高灵敏度的优势就能够实现单电子自旋、单核自旋的测量. 借鉴传统的磁共振技术, NV色心能够实现单分子核磁共振^[1,2]和单分子顺磁共振^[3], 为解析分子结构、研究分子动力学等问题提供了一种有力的手段.

进一步, 将NV色心磁测量技术和扫描成像技术结合起来, 能够实现高灵敏度和高分辨率的磁成像. 在磁学和磁性材料研究中, 确定一个样品的磁性结构分布对科学研究和应用开发都是一个重要的问题. 相比传统的磁成像技术, 基于NV色心的

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB921800)、国家自然科学基金(批准号: 81788101, 11227901, 11544012)、中国科学院(批准号: GJJSTD20170001, QYZDY-SSW-SLH004)、安徽省量子信息技术引导专项(批准号: AHY050000)和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wpf@ustc.edu.cn

磁成像技术不仅具有纳米量级的空间分辨率和微特斯拉量级的磁灵敏度^[4], 由于测量的是杂散场, 对待测样品没有厚度或者材质的要求, 而且测量对样品无损. 与类似的磁力显微镜相比, NV 色心磁成像能够给出定量的磁场结果, 而且 NV 色心作为单自旋探针, 所产生的磁场不会对待测样品有扰动. 由于具有的许多优点, 随着技术的成熟, 基于 NV 色心的量子传感器已经在磁性测量和成像领域产生了一些重要的科研成果.

2 NV 色心简介

NV 色心是金刚石中的一类缺陷, 由一个替代碳原子的氮杂质和相邻格点的空位构成(图 1(a)). 这里所指 NV 色心为带负电的 NV 色心. NV 色心的能级结构可以由六电子^[5-7]或两空穴模型^[8]通过群论求出, 基态自旋为 1, 其中单态是亚稳态, 相较于三重态基态存在时间较短^[9]. 能级结构如图 1(b)所示, 3E 和 3A_2 分别是三重态的激发态和基态, 1A_1 则是单态基态. 自旋三重态基态的磁量子数 $m_S = 0$ 与 $m_S = \pm 1$ 态(简并态)之间有 2.87 GHz 的零场分裂. NV 色心自旋从激发态回到基态有两种途径: 辐射跃迁和通过中间态 1A_1 的系间窜越(intersystem crossing, ISC)过程. ISC 过程涉及自旋态的改变^[10,11], 不会辐射出光子. $m_S = 0$ 与 $m_S = \pm 1$ 能够用同一频率激光实现非共振激发, $m_S = \pm 1$ 能够通过 ISC 过程无辐射跃迁回 $m_S = 0$

基态^[12,13](且其跃迁率与辐射跃迁接近), 考虑到亚稳态的平均寿命为 250 ns, 故 $m_S = \pm 1$ 态比 $m_S = 0$ 荧光率小 30% 左右. 使用激光激发 NV 色心自旋态后, 根据荧光计数的不同就可以实现 NV 色心自旋态的读出^[14]. 同样, 由于 $m_S = \pm 1$ 态能够以不小的跃迁率跃迁回 $m_S = 0$ 基态, 通过反复激发, $m_S = \pm 1$ 态以较高的保真度制备到 $m_S = 0$ 态^[10,11], 也就实现了自旋极化.

考虑自旋三重态, 在自旋算符 S_z 本征矢下(通常 NV 轴为 z 方向)NV 色心的哈密顿量一般可以写为^[15]

$$H = DS_z^2 \pm \gamma B_z S_z, \quad (1)$$

式中前一项是零场分裂项, 由电子自旋之间的相互作用导致, D 是零场分裂; 后一项是塞曼项, B_z 是外磁场, γ 是旋磁比. 实际上, 零场分裂项为张量, 非对角项近似为零. 但在存在横向电场^[16,17]或横向应力^[18]时, 非对角项不为零, 上式不再满足. 这也是 NV 色心测量电场和应力的原理. 存在横向磁场的情况下 m_S 不再是好量子数, 这会造成 $m_S = 0$ 与 $m_S = \pm 1$ 之间的跃迁从而导致 NV 色心荧光计数的下降, 所以实验中外磁场方向通常沿 NV 的对称轴轴向方向. 在外磁场作用下, $m_S = \pm 1$ 态解除简并. 因此 $m_S = 0$ 可以与 $m_S = -1$ 或 $m_S = +1$ 构成一个量子比特, 用微波可以操控 $m_S = 0$ 与 $m_S = -1$ 或 $m_S = +1$ 之间的跃迁. 这样的二能级系统也是将 NV 色心作为量子传感器的基础.

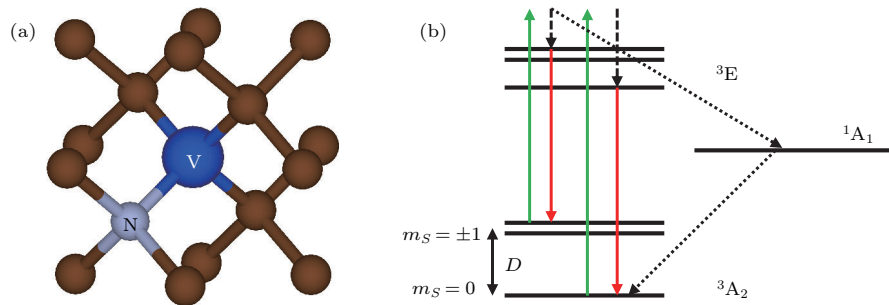


图 1 NV 色心晶体结构和能级结构 (a) 晶体结构; (b) 能级结构

Fig. 1. Crystal structure and energy level structure of NV center: (a) Crystal structure; (b) energy level structure.

3 磁性测量

3.1 磁场测量

首先, 对于静磁场测量, 最简单和直接的方法就是测量共振谱, 即光探测磁共振(optical detec-

tion magnetic resonance, ODMR) 谱. 由哈密顿量((1)式)可知, NV 色心的能级随着外磁场的变化而改变, 从共振谱得到的能级劈裂就可以计算出相应的磁场. 通过微波操控利用 NV 色心的量子相干性质, 磁场测量可以达到更高的灵敏度. 2008 年, Taylor 等^[19]理论上提出了使用基于 NV 色心的自

旋量子干涉仪进行磁场测量的方式, 可以实现静磁场和交变磁场的测量. 以图 2 (a) 中 Ramsey 序列为例, $\pi/2$ 脉冲将极化后的 NV 色心制备到两个子能级的叠加态, 在静磁场中演化会使叠加态的两个量子态之间积累一个相对相位, 随后的 $\pi/2$ 脉冲将相位转换为布居的差别, 最后用激光读出. 若静磁场为 B , 脉冲间隔即演化时间为 τ , 则积累相位为 $\phi = \gamma B\tau$, 相应的布居为 $\cos(\gamma B\tau)$.

交变磁场测量也可以用相应的脉冲序列实现. 由于交变磁场在一段时间积累的相位较小且可能为 0, 可以在演化过程中加入额外的 π 脉冲来翻转

相位 (图 2 (a)). 交变场 $B(t)$ 积累的相位为

$$\phi = \int_{\tau/2}^{\tau} \gamma B(t) dt - \int_0^{\tau/2} \gamma B(t) dt,$$

当脉冲间隔 τ 与交变场频率匹配时, 积累的相位最大从而达到最大的测量灵敏度. 这种方式通过扫描脉冲间隔 τ 也可以测量交变场的频率. 当交变场频率较高时, 如达到 GHz 频段, 由于脉冲操控速度的限制, 上述方法不再适用. 另一种方法是利用 Rabi 振荡来测量交变场, 这种方法还可以重构出矢量微波场 [20].

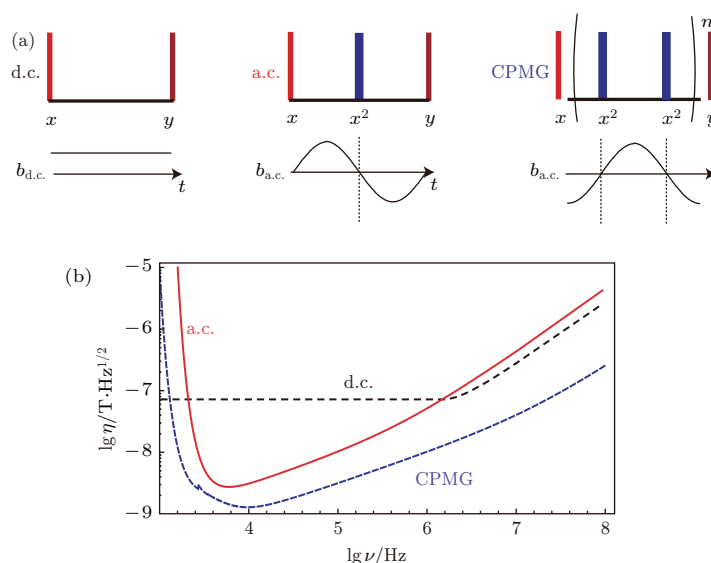


图 2 磁场测量的不同脉冲序列和相应的灵敏度 [19] (a) 磁场测量的不同脉冲序列, x 和 y 是操控微波的偏振方向; 左侧为测量静态场的 Ramsey 序列, 两个脉冲 x 和 y 是 $\pi/2$; 中间为测量交变场的回波序列, x^2 是 π 脉冲; 右侧为更高灵敏度测量交变场的 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 序列, n_C 是 π 脉冲对的数目; (b) 单 NV 色心测量静态场和交变场的灵敏度与信号频率 ν 的关系

Fig. 2. Control sequences for various operation modes of the magnetometer and corresponding sensitivities to magnetic fields [19]. (a) ESR pulse sequences for magnetometry, where x and y indicate the linear polarization of the ESR pulse in the laboratory frame. Left: Ramsey pulse sequence for d.c.-field measurement. Middle: Echo-based pulse sequence for a.c. magnetometry. Right: CPMG-based pulse sequence for improved a.c. magnetometry, where n_C is the number of repetitions of the paired π pulses. (b) d.c. and a.c. sensitivity to magnetic fields for a single nitrogen-vacancy centre as a function of signal frequency, ν .

图 2 (b) 给出了脉冲方式测量磁场理论上能达到的灵敏度 [19]. Maze 等 [21] 利用超纯的金刚石经过 100 s 采样在 kHz 频段实现了 3 nT 的磁场分辨率. 对脉冲序列进一步的优化可以提高灵敏度 [22,23].

3.2 自旋测量

NV 色心测量磁场的高灵敏度及其原子尺度的结构, 使得利用 NV 色心来测量 (单个) 自旋信号具

有可行性. 2005 年, Epstein 等 [24] 利用 NV 色心荧光研究了 NV 色心之间 (即电子自旋) 以及和 NV 色心中 N 核自旋的相互作用. 随后 Gaebel 等 [25] 使用自旋-自旋双共振的方式测量了金刚石内部、NV 色心附近的氮原子电子自旋, 实现了对氮原子电子自旋的谱学测量和量子操纵. 金刚石内邻近 ^{13}C 核自旋的测量 [26,27] 展示出了利用 NV 色心开展核磁共振和顺磁共振研究的潜力. 数值研究表明 NV 色心具有测量远距离包括金刚石外核自旋团簇的能

力^[28], 实验上也实现了金刚石内弱耦合的远距离¹³C核的测量^[1]以及金刚石外固态和液态样品中氢核的探测(图3(a)和图3(b))^[2]. 对两个¹³C核自旋组成的核自旋对的测量能够确定其精确的空间位置^[29], 这在原理上展示了基于NV色心的单分子核磁共振技术. 甚至在强耦合情况下能够测量到数个²⁹Si原子核, 得到核磁共振谱并且确定核自旋的空间位置^[30]. 通过使用靠近金刚石表面的

NV色心, 将蛋白质分子标记上氮氧自由基后撒在金刚石表面, 在室温大气环境下实现了单个蛋白质分子上电子自旋标记的顺磁共振谱测量(图3(c)和图3(d))^[3]. 利用关联谱测量交变场得到的共振谱线宽足够小, 可以用这种方式测量化学位移^[31]. 至此, 尽管还需要更多的研究, 利用NV色心进行单分子核磁共振和单分子顺磁共振测量的方法已经基本建立.

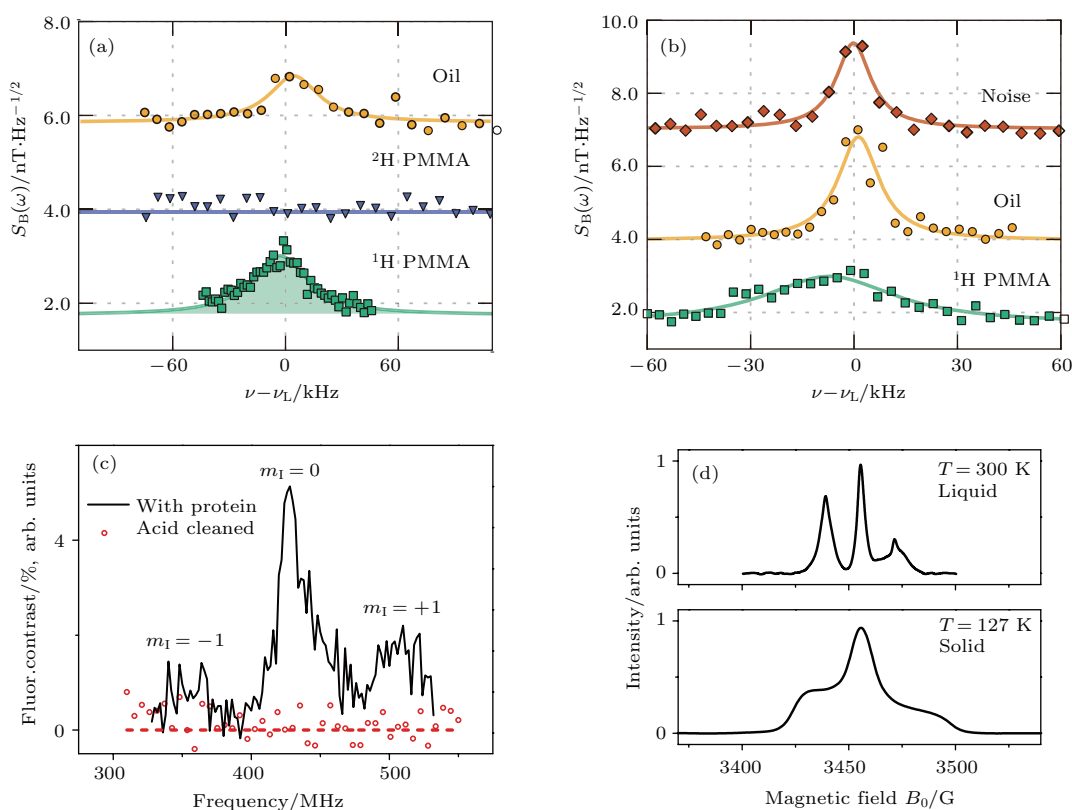


图3 NV色心测量的磁共振谱 (a) 固态和液态样品中的氢核自旋核磁共振谱^[2]; (b) 更高分辨率的核磁共振谱^[2]; (c) 单蛋白质分子自旋标记的顺磁共振谱^[3]; (d) 液态和固态的系综顺磁共振谱^[3]

Fig. 3. Resonance spectrum measurement by NV center: (a) Nuclear magnetic resonance spectrum of hydrogen nucleus in a liquid sample (immersion oil), a deuterated solid (²H PMMA), and a protonated solid sample (¹H PMMA, green squares)^[2]; (b) high-resolution spectrum^[2]; (c) electron spin resonance spectrum of a spin label in a protein^[3]; (d) Electron spin resonance spectrum of liquid and solid protein ensemble with a spin label^[3].

4 磁成像

在探索NV色心作为纳米尺度高灵敏度量子传感器的潜力的同时, 基于NV色心的磁成像技术也发展起来. 一种方式是利用NV色心系综或者阵列进行定点的磁成像^[19,32], 这种方法将包含多个NV色心的金刚石与待测样品靠近, 用共聚焦技术扫描每个色心的共振谱, 可以得到不同NV色心所处不同位置的磁场. 另一种方式是将包含NV色

心的金刚石作为磁探针, 结合原子力显微镜等扫描成像技术进行扫描的同时操控NV色心测量磁场. 2008年, Balasubramanian等^[33]用磁力显微镜扫描包含NV色心的金刚石纳米颗粒(图4(a)), 用NV色心测量到了图4(b)中的共振环. 在固定频率的微波辐射下, 当杂散场导致的NV色心塞曼能级与微波共振时会导致荧光计数下降, 共振环表示磁性针尖的磁场等高线. 同时采用图4(c)中将NV纳米颗粒附着在原子力显微镜针尖上的方式, 扫描图4(d)中磁性颗粒也得到了共振线. 实际上,

这也是利用 NV 色心进行磁成像的两种方式, 即待测样品附着在针尖上扫描金刚石和金刚石附着在针尖上扫描样品. 从实验中测得共振线的线宽估计空间分辨率为 20 nm, 改进实验条件可以达到纳米级别, 主要受限于磁场梯度和 NV 色心与样品的

距离. 基于这种方案扫描硬盘的磁场分布达到了 $9 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁场灵敏度和数十纳米的空间分辨率 [4]. Maletinsky 等 [34] 将加工为柱状的金金刚石作为扫描探针改进了荧光收集效率和灵敏度, 并增强了探针的鲁棒性.

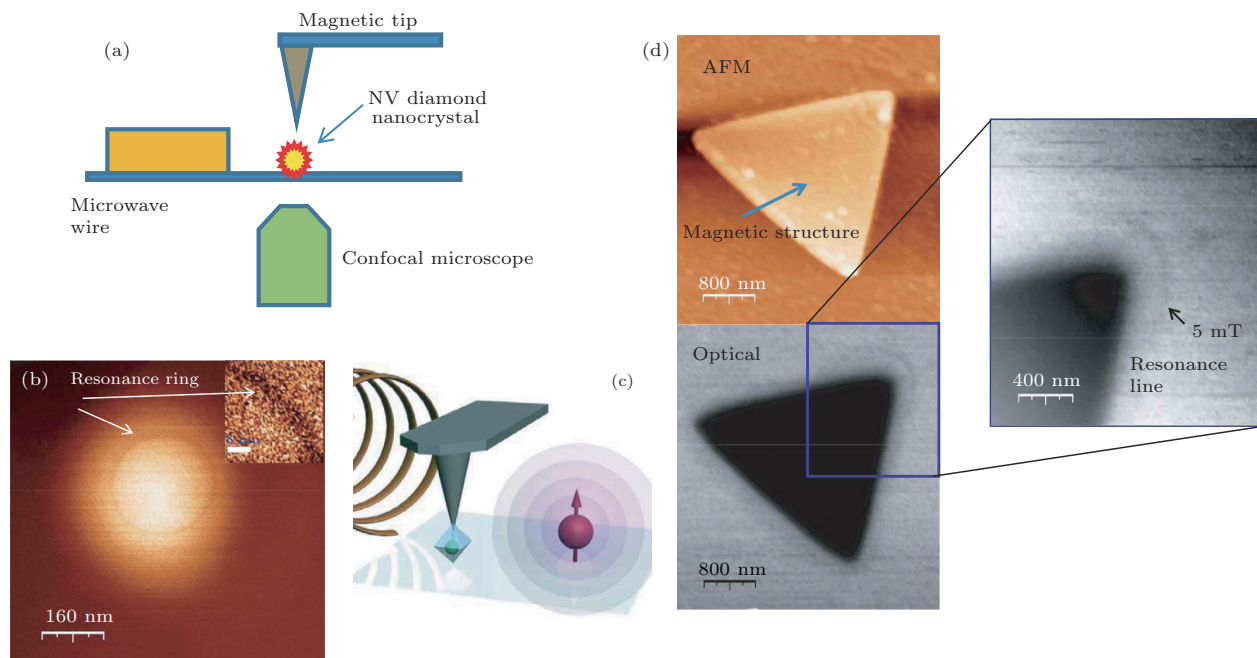


图 4 NV 色心磁成像方案示意图和共振环扫描 [33] (a) 磁性针尖扫描纳米金刚石颗粒示意图; (b) 磁性针尖扫描成像; (c) 纳米金刚石颗粒扫描磁性颗粒示意图; (d) 磁性颗粒扫描成像

Fig. 4. Schematic diagram of magnetic microscopy based on the NV center and resonance ring imaging [33]: (a) Diagram of magnetic tip scanning; (b) diamond nanocrystal scanning image by using magnetic tip; (c) diagram of scanning by diamond nanocrystal attached to a cantilever; (d) image of scanning a magnetic particle.

以上研究原理上展示出了 NV 色心磁成像技术的能力, 而将此技术用于研究中感兴趣的磁性结构, 也证实了 NV 色心磁成像技术可以作为磁性材料研究的有效手段. 例如扫描磁性涡旋 (vortex) 杂散场 [35,36], 能够确定 vortex 核心的极性和手性; 测量磁畴壁杂散场分布并且观察到激光实现磁畴壁驱动, 理论模型能够从实验结果中估计出材料中杂质密度和热激发下的钉扎强度 [37]; 实现空间测量非线性反铁磁序 [38]. 图 5 为 Rondin 等 [35] 用“双等高线”法测量的磁性 vortex 杂散场. “双等高线”法是指在扫描过程中测量两个固定频率微波辐射下的荧光计数差, NV 色心塞曼劈裂与两个频率共振时信号会为正或负, 其他磁场下为零, 也就是得到了两种磁场等高线. 值得注意的是, NV 色心作为磁力计的高灵敏度使其具有单核自旋成像的能力 [39], 为自旋电子学等领域的研究提供了一个有力的工具.

近些年由于拓扑非平庸的磁化结构和作为磁存储器件的潜力而引起广泛研究兴趣的磁性斯格明子 (skyrmion), 也可以利用 NV 色心磁成像技术测量杂散场并给出磁化分布的信息 [40]. 测量出 NV 色心的 $m_S = 0$ 到 $m_S = \pm 1$ 的两个共振峰, 可以解哈密顿量得出杂散场的沿 NV 色心轴和垂直于轴的磁场分量, 重构出的杂散场进而能够为判断磁性 skyrmion 的类型提供指导. 如图 6 (e) 所示, 在 Bloch 型 skyrmion 的假定下重构出的磁化分布中, 中心处 z 方向磁化几乎为零, 也就是磁化方向在面内, 这样的结构无法形成一个完整的 skyrmion. 而 Néel 型假定给出的磁化分布更加符合理论模型中 skyrmion 的磁化分布. 因此, Néel 型的 skyrmion 更加符合实验结果. 对一些新颖的磁性 skyrmion 结构, 如纳米条带的边缘态 [41] 和双斯格明子 [42], 基于 NV 色心的磁成像将能够为解析其磁化结构提供帮助.

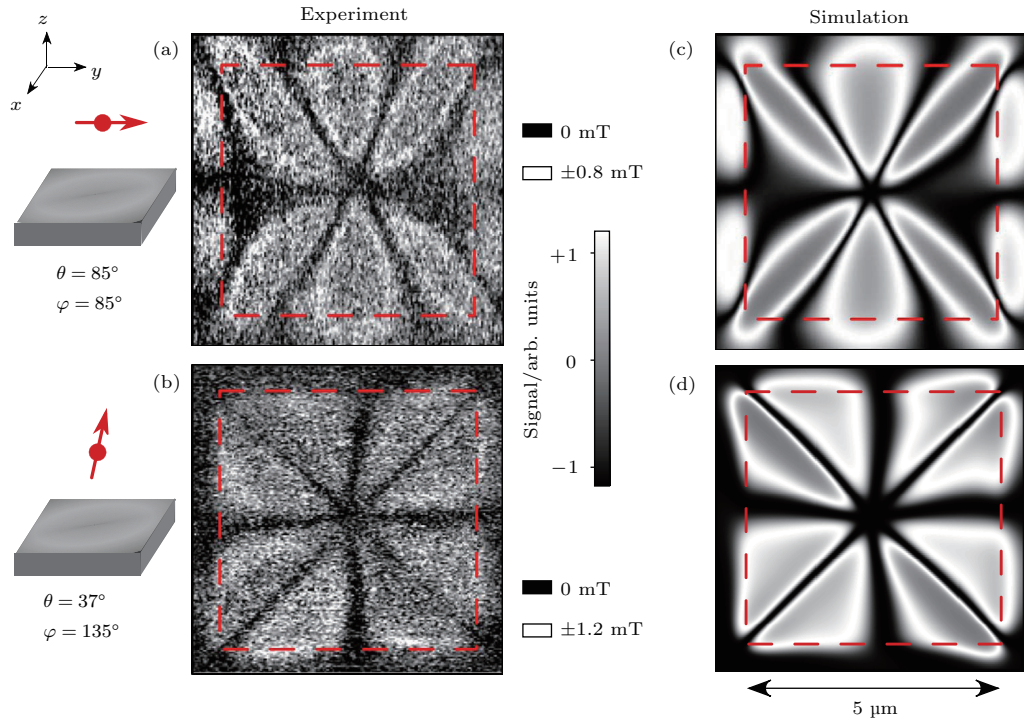


图5 磁性 vortex 的杂散场扫描 [35] (a), (b) 不同 NV 轴朝向和 NV 色心到样品距离下的杂散场扫描; (c), (d) 相应的磁场仿真结果; 磁性 vortex 是一种具有手性的磁性结构, 在自旋动力学和磁存储器件等方面有重要研究价值

Fig. 5. Imaging stray field of a magnetic vortex [35]: (a), (b) Stray field image with different NV directions and distances; (c), (d) corresponding simulations of stray field. Magnetic vortex is one kind of chiral magnetic structure, and has important value in many study fields such as spin dynamics and magnetic storage instrument.

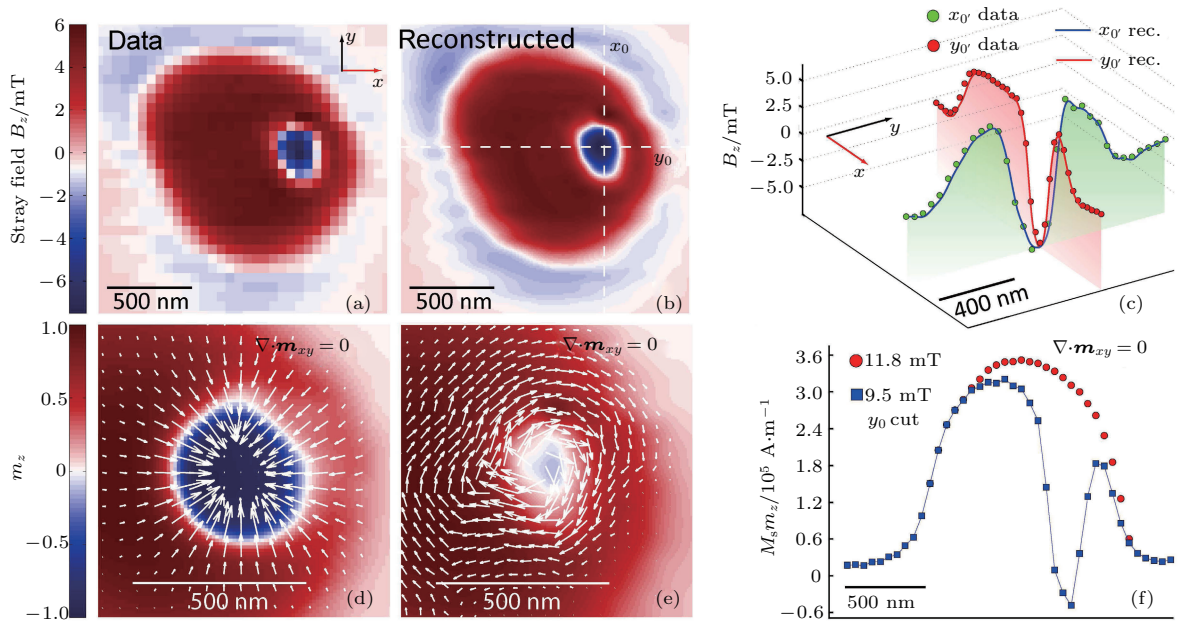


图6 磁性 skyrmion 杂散场和磁化分布 [40] (a) 测量得到的杂散场 z 方向分量; (b) 在 Néel 型和 Bloch 型假定下仿真的杂散场 z 方向分量; (c) (b) 图中在 $x = x_0$ 和 $y = y_0$ 处切面与实验值的比较; (d), (e) Néel 型和 Bloch 型假定下的磁化分布; (f) Bloch 型假定下 $y = y_0$ 处在不同外磁场下磁化强度切面

Fig. 6. Stray field and magnetization distribution of the skyrmion [40]: (a) z -component of the stray field from measured data; (b) simulated map of z -component of the stray field in both the Néel and the Bloch assumption; (c) cuts along the $x = x_0$ and $y = y_0$ lines shown in (b) (solid lines) and comparison with experimental data in (a) (markers); (d), (e) magnetization distribution obtained in the Néel and the Bloch assumption, respectively; (f) comparison between the reconstructed local magnetization in the Bloch assumption at two different bias fields.

5 总结与展望

NV色心作为磁力计具有灵敏度高、原子尺寸、可工作在室温等诸多优势,相关技术也一直在进步和发展.虽然基于NV色心的磁场测量和成像领域发展了仅有10年左右,其在灵敏度、空间分辨率和工作条件方面巨大的优势,使得该领域发展极其迅速.进一步的技术发展将赋予NV色心成像技术更强大的能力.针对样品的磁性研究,NV色心在磁场测量动态范围、测量带宽等方面亟待提升,以能够测量快速变化或涨落的磁场,例如自旋流、磁振子等.另一方面,NV色心成像具有能够同时进行多种信息扫描成像的潜力,比如形貌和磁场同时扫描,发挥NV色心测量电场的能力则可能进行静电场扫描;利用NV色心测量交变场的方法可以测量自旋波^[43],与扫描成像技术结合可能进行局域的磁性材料微波响应研究.

NV色心已经成为在磁性测量、单分子磁共振和磁成像等领域有着重要应用价值的研究手段.虽然其存在着一些难以克服的限制因素,技术和工艺的进步和成熟将改善基于NV色心的磁测量和磁成像技术的性能,并将其应用到更广泛的研究领域.

感谢合肥物质科学研究院杜海峰研究员和中国科学院物理研究所王文洪研究员的讨论.

参考文献

- [1] Kolkowitz S, Unterreithmeier Q P, Bennett S D, Lukin M D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 137601
- [2] Staudacher T, Shi F, Pezzagna S, Meijer J, Du J, Meriles C A, Reinhard F, Wrachtrup J 2013 *Science* **339** 561
- [3] Shi F, Zhang Q, Wang P, Sun H, Wang J, Rong X, Chen M, Ju C, Reinhard F, Chen H, Wrachtrup J, Wang J, Du J 2015 *Science* **347** 1135
- [4] Rondin L, Tetienne J P, Spinicelli P, Dal Savio C, Karrai K, Dantelle G, Thiaville A, Rohart S, Roch J F, Jacques V 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 153118
- [5] Lenef A, Rand S C 1996 *Phys. Rev. B* **53** 13441
- [6] Goss J P, Jones R, Briddon P R, Davies G, Collins A T, Mainwood A, van Wyk J A, Baker J M, Newton M E, Stoneham A M, Lawson S C 1997 *Phys. Rev. B* **56** 16031
- [7] Lenef A, Rand S C 1997 *Phys. Rev. B* **56** 16033
- [8] Maze J R, Gali A, Togan E, Chu Y, Trifonov A, Kaxiras E, Lukin M D 2011 *New J. Phys.* **13** 025025
- [9] Acosta V M, Jarmola A, Bauch E, Budker D 2010 *Phys. Rev. B* **82** 201202
- [10] Harrison J, Sellars M J, Manson N B 2004 *J. Lumin.* **107** 245
- [11] Harrison J, Sellars M J, Manson N B 2006 *Diam. Relat. Mater.* **15** 586
- [12] Rogers L J, Armstrong S, Sellars M J, Manson N B 2008 *New J. Phys.* **10** 103024
- [13] Manson N, Rogers L, Doherty M, Hollenberg L 2010 arXiv:1011.2840 [cond-mat, physics:quant-ph]
- [14] van Oort E, Manson N B, Glasbeek M 1988 *J. Phys. C: Solid State Phys.* **21** 4385
- [15] Neumann P 2012 *Ph. D. Dissertation.* (Stuttgart: University Stuttgart)
- [16] Hauf M V, Grotz B, Naydenov B, Dankerl M, Pezzagna S, Meijer J, Jelezko F, Wrachtrup J, Stutzmann M, Reinhard F, Garrido J A 2011 *Phys. Rev. B* **83** 081304
- [17] Liu X, Wang G, Song X, Feng F, Zhu W, Lou L, Wang J, Wang H, Bao P 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 233112
- [18] Cui J M, Sun F W, Chen X D, Gong Z J, Guo G C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 153901
- [19] Taylor J M, Cappellaro P, Childress L, Jiang L, Budker D, Hemmer P R, Yacoby A, Walsworth R, Lukin M D 2008 *Nat. Phys.* **4** 810
- [20] Wang P, Yuan Z, Huang P, Rong X, Wang M, Xu X, Duan C, Ju C, Shi F, Du J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6631
- [21] Maze J R, Stanwix P L, Hodges J S, Hong S, Taylor J M, Cappellaro P, Jiang L, Dutt M V G, Togan E, Zibrov A S, Yacoby A, Walsworth R L, Lukin M D 2008 *Nature* **455** 644
- [22] de Lange G, Ristè D, Dobrovitski V V, Hanson R 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 080802
- [23] Wang P, Ju C, Shi F, Du J 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 2920
- [24] Epstein R J, Mendoza F M, Kato Y K, Awschalom D D 2005 *Nat. Phys.* **1** 94
- [25] Gaebel T, Domhan M, Popa I, Wittmann C, Neumann P, Jelezko F, Rabeau J R, Stavrias N, Greentree A D, Prawer S, Meijer J, Twamley J, Hemmer P R, Wrachtrup J 2006 *Nat. Phys.* **2** 408
- [26] Childress L, Dutt M V G, Taylor J M, Zibrov A S, Jelezko F, Wrachtrup J, Hemmer P R, Lukin M D 2006 *Science* **314** 281
- [27] Dutt M V G, Childress L, Jiang L, Togan E, Maze J, Jelezko F, Zibrov A S, Hemmer P R, Lukin M D 2007 *Science* **316** 1312
- [28] Zhao N, Hu J L, Ho S W, Wan J T K, Liu R B 2011 *Nat. Nanotech.* **6** 242
- [29] Shi F, Kong X, Wang P, Kong F, Zhao N, Liu R B, Du J 2013 *Nat. Phys.* **10** 21
- [30] Müller C, Kong X, Cai J M, Melentijević K, Stacey A, Markham M, Twitchen D, Isoya J, Pezzagna S, Meijer J, Du J F, Plenio M B, Naydenov B, McGuinness L P, Jelezko F 2014 *Nat. Commun.* **5** 4703
- [31] Kong X, Stark A, Du J, McGuinness L P, Jelezko F 2015 *Phys. Rev. Applied* **4** 024004

- [32] Maertz B J, Wijnheijmer A P, Fuchs G D, Nowakowski M E, Awschalom D D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 092504
- [33] Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R, Al-Hmoud 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
- [34] Maletinsky P, Hong S, Grinolds M S, Hausmann B, Lukin M D, Walsworth R L, Loncar M, Yacoby A 2012 *Nat. Nanotech.* **7** 320
- [35] Rondin L, Tetienne J P, Rohart S, Thiaville A, Hingant T, Spinicelli P, Roch J F, Jacques V 2013 *Nat. Commun.* **4** 2279
- [36] Tetienne J P, Hingant T, Rondin L, Rohart S, Thiaville A, Roch J F, Jacques V 2013 *Phys. Rev. B* **88** 214408
- [37] Tetienne J P, Hingant T, Kim J V, Diez L H, Adam J P, Garcia K, Roch J F, Rohart S, Thiaville A, Ravelosona D, Jacques V 2014 *Science* **344** 1366
- [38] Gross I, Akhtar W, Garcia V, Martínez L J, Chouaieb S, Garcia K, Carrétéro C, Barthélémy A, Appel P, Maletinsky P, Kim J V, Chauleau J Y, Jaouen N, Viret M, Bibes M, Fusil S, Jacques V 2017 *Nature* **549** 252
- [39] Grinolds M S, Hong S, Maletinsky P, Luan L, Lukin M D, Walsworth R L, Yacoby A 2013 *Nat. Phys.* **9** 215
- [40] Dovzhenko Y, Casola F, Schlotter S, Zhou T X, Büttner F, Walsworth R L, Beach G S D, Yacoby A 2016 arXiv:1611.00673 [cond-mat]
- [41] Du H, Che R, Kong L, Zhao X, Jin C, Wang C, Yang J, Ning W, Li R, Jin C, Chen X, Zang J, Zhang Y, Tian M 2015 *Nat. Commun.* **6** 8504
- [42] Wang W, Zhang Y, Xu G, Peng L, Ding B, Wang Y, Hou Z, Zhang X, Li X, Liu E, Wang S, Cai J, Wang F, Li J, Hu F, Wu G, Shen B, Zhang X X 2016 *Adv. Mater.* **28** 6887
- [43] van der Sar T, Casola F, Walsworth R, Yacoby A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7886

SPECIAL TOPIC — Magnetic skyrmions

Nanoscale magnetic field sensing and imaging based on nitrogen-vacancy center in diamond*

Wang Cheng-Jie¹⁾³⁾⁴⁾ Shi Fa-Zhan¹⁾²⁾³⁾⁵⁾ Wang Peng-Fei¹⁾²⁾³⁾⁵⁾†
 Duan Chang-Kui¹⁾³⁾⁴⁾ Du Jiang-Feng¹⁾²⁾³⁾⁵⁾

1) (CAS Key Laboratory of Microscale Magnetic Resonance, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2) (Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3) (Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

4) (Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

5) (Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 31 January 2018; revised manuscript received 13 April 2018)

Abstract

Magnetic field measurement and imaging with nanometer resolution is a key tool in the study of magnetism. There have been several powerful techniques such as superconducting quantum interference device, hall sensor, electron microscopy, magnetic force microscopy and spin polarized scanning tunneling microscopy. However, they either have poor sensitivity or resolution, or need severe environment of cryogenic temperature or vacuum. The nitrogen-vacancy color center (NV center) in diamond, serving as a quantum magnetic sensor, has great advantages such as long decoherence time, atomic size, and ambient working conditions. The NV center consists of a substitutional nitrogen atom and an adjacent vacancy in diamond. Its electronic structure of ground state is a spin triplet. The spin state can be initialized to $m_S = 0$ state and read out by laser pulse, and coherently manipulated by microwave pulse. It is sensitive to the magnetic field by measuring the magnetic Zeeman splitting or quantum phase in quantum interferometer strategies. By using dynamical decoupling sequence to prolong the decoherence time, the sensitivities approach to nano tesla for a single NV center and pico tesla for the NV center ensemble, respectively. As a sensor with an atomic size, it reaches single-nuclear-spin sensitivity and sub-nanometer spatial resolution. Combining with scanning microscopy technology, it can accomplish high-sensitivity and high-resolution magnetic field imaging so that the stray field can be reconstructed quantitatively. The magnetic field is calculated from the two resonant frequencies by solving the Hamiltonian of NV center in order to obtain the value of stray field. Recently, this novel magnetic imaging technique has revealed the magnetization structures of many important objects in magnetism research. The polarity and chirality of magnetic vortex core are determined by imaging its stray field; laser induced domain wall hopping is observed quantitatively with a nanoscale resolution; non-linear antimagnetic order is imaged in real space by NV center. It was recently reported that magnetization of the magnetic skyrmion is imaged by NV center. The magnetization distribution is reconstructed from stray field imaging. With the topological number limited to one, the Néel type magnetization is uniquely determined. These results show that the magnetic imaging method has great advantages to resolve the emerging magnetic structure materials. The magnetic imaging technology based on the NV center will potentially become an important method to study magnetic materials under continuous development.

Keywords: nitrogen-vacancy color center, quantum measurement, magnetic sensing, magnetic imaging

PACS: 07.55.Ge, 07.57.Pt, 52.70.Gw, 07.79.-v

DOI: 10.7498/aps.67.20180243

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB921800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 81788101, 11227901, 11544012), the CAS (Grant Nos. GJJSTD20170001, QYZDY-SSW-SLH004), the Anhui Initiative in Quantum Information Technologies, China (Grant No. AHY050000), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

† Corresponding author. E-mail: wpf@ustc.edu.cn