

专题: 量子光学原理与应用

固态色心高压下量子磁探测研究进展*

孙程美 仲成 段有意 周昊杰 王俊峰†

(四川大学物理学院, 成都 610064)

(2025年10月10日收到; 2025年11月7日收到修改稿)

高压科学已成为探索物质在极端条件下新物态、新现象的核心前沿领域之一。高压环境中, 磁场、压强等物理量的原位探测, 对揭示物质在极端条件下的行为具有重要意义。然而, 传统高压磁探测技术普遍面临空间分辨率低、灵敏度差、难以实现原位磁探测等难题。近年来, 基于金刚石 NV 色心、碳化硅空位/双空位色心及六方氮化硼色心等的固态量子传感器, 所构建的高压量子精密测量技术, 凭借微米级空间分辨率、高灵敏度与优异的原位探测能力, 为高压科学研究提供了创新性技术手段。本文系统地总结了高压极端条件对上述固态色心光学、自旋性质的影响, 并以磁性材料的高压磁相变探测、超导材料的迈斯纳效应测量为例, 介绍了基于固态色心高压下原位磁探测研究进展。该综述旨在为未来基于固态色心高压下量子精密测量的发展提供一定的技术路线指引。

关键词: 高压, 固态色心, 光探测磁共振, 原位磁探测**DOI:** 10.7498/aps.75.20251370**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251370

1 引言

压强是与温度具有相同基础性地位的重要热力学参量, 能够通过改变物质原子或分子间距来直接调控其微观结构、电子状态及化学性质^[1], 并推动材料跨越绝缘体与导体^[2]、非晶体与晶体^[3]、低能量密度与高能量密度^[4]等之间的传统障碍。特别是在凝聚态物理领域, 高压技术已成为探索新奇物态的核心实验手段。例如, 许多二维磁性材料的磁性在高压下有新奇磁现象^[5-11]; 而富氢氢化物体系则在高压下表现出了近室温的超导转变^[12,13]。然而, 实现高压环境的特殊实验条件对高压下的物性测量提出了严峻挑战。特别是磁性测量, 传统探测方法如基于线圈的交流磁化率测量^[14]以及超导量子干涉仪^[15]等, 往往受限于灵敏度和空间分辨率, 难以在微小对顶砧样品腔中实现原位、高精度探测。这极大地限制了高压下的磁性研究, 如高压超

导研究的关键瓶颈——迈斯纳效应等抗磁性的有效检测, 因此亟须发展适用于高压下磁探测的精密测量手段。

近些年来, 基于固态色心的量子精密测量技术因其原位高灵敏度、高空间分辨率的优势, 已经成为高压下磁探测重要探测手段之一。其中, 以金刚石氮-空位 (nitrogen vacancy, NV) 色心^[16-21], 碳化硅空位色心 (V_{Si})、双空位色心 ($V_{Si}V_C$)^[22-25], 以及六方氮化硼 (hBN) 硼空位 (V_B) 色心^[26-30]等为代表的固态量子传感器, 表现出显著的优势: 其具有原子尺度的空间分辨率、优异的光稳定性和磁灵敏度, 且能够在高压腔内实现原位探测与量子态调控, 为高压下的磁探测提供了全新途径。近年来, 固态色心在高压下量子磁探测领域已经取得了较大进展, 如金刚石 NV 色心和碳化硅色心已被成功应用于高压下的磁性材料磁相变探测与超导迈斯纳效应的测量^[31-38]。这不仅推动了高压量子测量技术的快速发展, 也为高压下物质行为的深入研究

* “量子通信与量子计算机”国家科技重大专项 (批准号: 2024ZD0302100) 和国家自然科学基金 (批准号: 12474499) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: jfwang@scu.edu.cn

提供了前所未有的技术平台。

本文聚焦于金刚石 NV 色心、碳化硅 V_{Si} 和 $V_{Si}V_C$ 色心以及六方氮化硼 V_B^- 色心等固态色心量子传感器在高压下的基本性质与应用。将首先介绍高压下固态色心的光学、自旋性质；之后介绍它们在高压下探测磁性材料磁相变和超导迈斯纳效应原位测量的应用进展；最后对固态色心高压下量子磁探测的发展与挑战进行了展望。

2 高压下固态色心的性质

2.1 高压下金刚石 NV 色心的性质

以 NV 色心为代表的固态自旋传感器，其核心机制是利用与电子自旋态相关的光学读出自旋信号来精确探测外界磁场。如图 1(a) 所示，NV 色心的电子基态是一个自旋三重态 ($S = 1$)，在激光照射下将电子从基态泵浦到能量较高的激发态，电子会迅速通过发射声子的方式弛豫到激发态的能级底部^[39]。处于激发态的电子可通过两种路径返回基态：其一为自旋守恒的自发辐射过程 (图中红色箭头)，该过程释放荧光信号；其二为经由亚稳态的无辐射跃迁过程 (图中黄色箭头)，即激发态电子通过系间窜跃 (ISC) 进入亚稳态，再弛豫回基态，此过程释放红外波段的荧光信号。从激发态的 $|m_s =$

$\pm 1\rangle$ 态通过 ISC 跃迁到亚稳态的概率，远大于从 $|m_s = 0\rangle$ 态的概率。经过多次 (通常只需几微秒) “泵浦-弛豫”循环后，电子会越来越大概率被“捕获”并最终停留在 $|m_s = 0\rangle$ 基态上。因此通过探测其荧光强度的变化可以对自旋态状态进行有效读出。当施加共振微波场时，自旋会发生磁共振跃迁，导致荧光强度显著降低，通过扫描微波频率即可获得荧光强度随频率变化的光探测磁共振谱 (ODMR)。由于 NV 色心的自旋能级在外部磁场作用下会因塞曼效应发生线性分裂，因此通过精确测量 ODMR 谱中共振峰的移动或分裂间隔 (图 1(b))，即可直接、定量地反演出待测磁场的强度与方向，从而实现高灵敏度的磁场探测。

金刚石对顶砧是一种产生极端静态高压的实验装置，图 1(c) 展示了利用两颗金刚石的尖端 (砧面) 对微小样品进行挤压，通过机械系统对金刚石施加压力^[40]。自 2014 年首次实现 60 GPa 下 NV 色心光谱和 ODMR 谱的探测以来^[41]，研究人员不断提高压力环境研究金刚石 NV 色心的性质。百 GPa 量级的高压环境对凝聚态物理和地球物理的变革性研究具有重要意义，但长期以来，超高压条件下的原位磁性测量始终面临很大的技术瓶颈。近几年，研究人员突破性地将金刚石 NV 色心成功应用于 140 GPa 超高压环境的原位磁探测，通过 ODMR

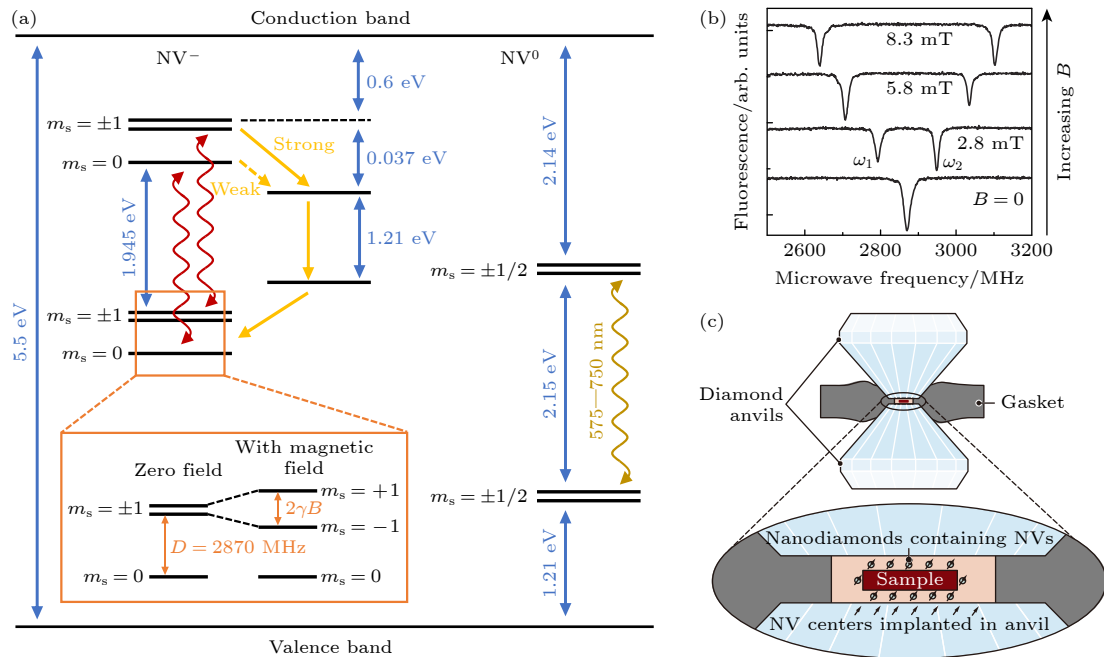


图 1 (a) 金刚石 NV 色心能级结构示意图^[39]; (b) ODMR 峰值磁场依赖性^[16]; (c) 金刚石色心对顶砧基本结构^[40]

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the energy level structure for NV center in diamond^[39]; (b) magnetic field dependence of ODMR peaks^[16]; (c) basic structure of a diamond anvil cell^[40].

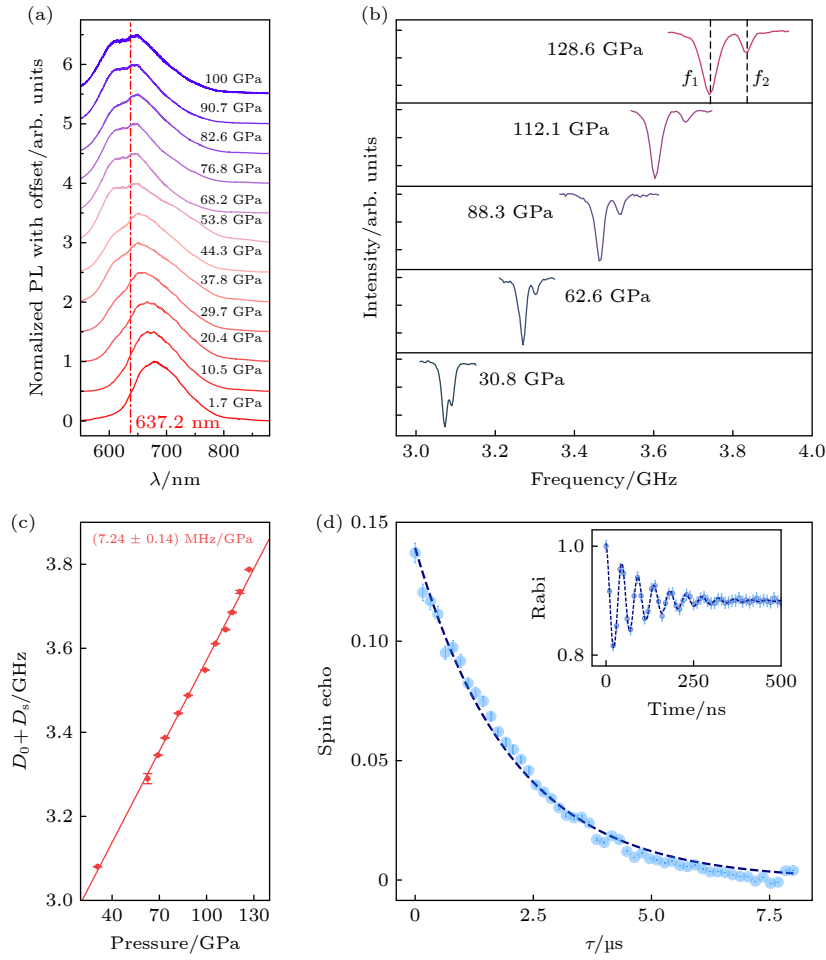


图 2 高压对金刚石 NV 色心光学和自旋性质的影响 (a) 不同压强下金刚石 NV 色心的荧光光谱^[42]; (b) 不同压强下 (111) 晶向的金刚石对顶砧砧面浅层 NV 色心零场 ODMR 谱^[35]; (c) 零场分裂值 D 随压强变化规律^[35]; (d) 137 GPa 时 NV 色心的拉比振荡和自旋相干时间^[34]

Fig. 2. Influence of pressure on the optical and spin properties of NV centers: (a) PL spectra of NV centers under different pressures^[42]; (b) ODMR spectra of NV centers under different pressures, the experiment is performed with shallow NV centers in (111) cut diamond^[35]; (c) pressure dependence of zero field splitting, D ^[35]; (d) a spin echo (that is, pulsed) measurement NV coherence at pressures of 137 GPa^[34].

方法实现了高压下自旋量子态的高精度读出。如图 2(a) 所示, 通过测量不同压力下 NV 色心的光致发光光谱证实高压会导致 NV 色心的光谱蓝移和信号减弱, 但其荧光在 100 GPa 时仍然可以被有效探测^[42]。Wang 等^[35]测试了 [111] 晶向金刚石 NV 色心的 ODMR, 发现对比度在 130 GPa 仍然很高 (图 2(b))。图 2(c) 展示了零场分裂值 D 随压强变化规律, 其在 130 GPa 范围内, 零场分裂参数随压力的变化率为 (7.24 ± 0.14) MHz/GPa。同样地, Bhattacharyya 等^[34]在 137 GPa 高压下实现了金刚石 NV 色心的自旋相干操控, 通过自旋回波测量得到其相干时间 $T_2 = 2.04 \mu\text{s}$ 。

单点测量 D 的压力斜率提供了有价值的原位压力标定信息, 但其信息量有限。而基于 NV 色心的二维扫描成像技术, 能够将测量从“点”扩展到

“场”。Hsieh 等^[31]通过将 NV 色心作为纳米级量子传感器集成到金刚石压砧的砧面中, 利用扫描共聚焦显微镜在砧面表面进行二维空间扫描, 在每个测量点获取 ODMR 光谱, 从而获得包含 8 个共振频率的谱线, 这些频率对应 4 个 NV 取向的自旋能级移位和分裂, 其变化受局部应力张量的影响。通过这种多点测量策略, 能够提取每个位置的应力诱导参数。这种方法以优于 0.01 GPa 的精度量化了全部 6 个应力分量。

2.2 高压下碳化硅空位色心 (V_{Si}) 的性质

近年来, 碳化硅色心体系在极端环境下的磁学测量中展现出显著优势。作为一种宽禁带半导体材料, 碳化硅具备成熟的半导体工艺基础、优异的英寸级单晶生长能力以及成熟的微纳加工工艺^[22,43],

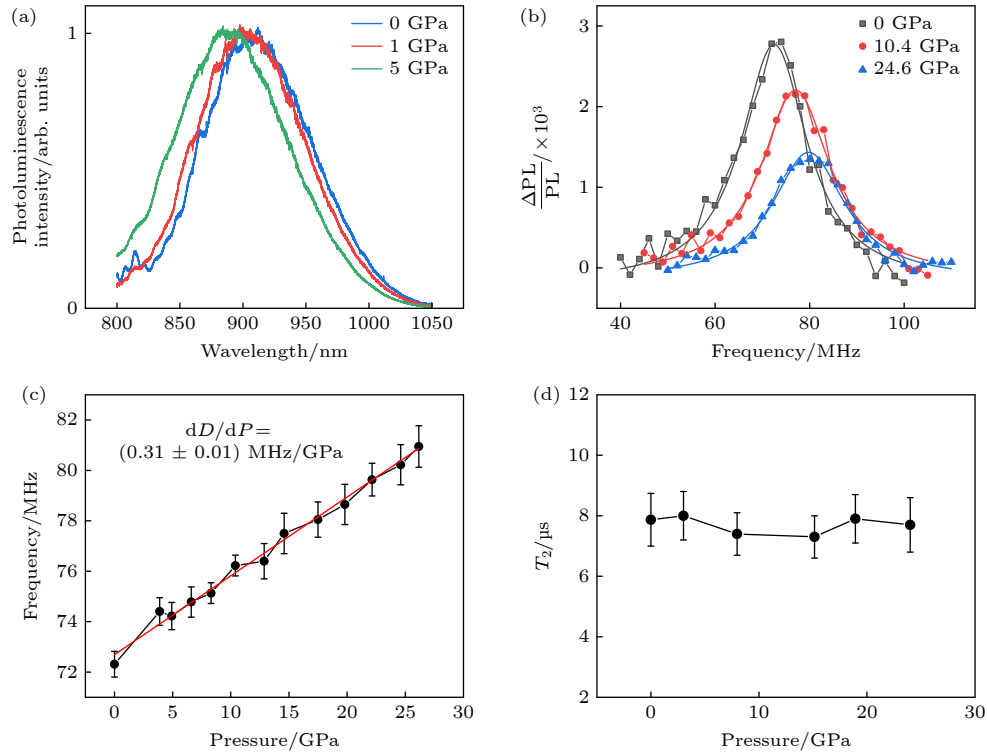


图 3 高压对碳化硅空位 V_{Si} 光学和自旋性质的影响 (a) 三个不同高压下 V_{Si} 色心的室温光谱^[38]; (b) 在三种不同压力和零外磁场下的 ODMR 谱. 实线表示洛伦兹拟合^[38]; (c) 在 27 GPa 压力范围内, D 呈线性增加, 斜率为 $(0.31 \pm 0.01) \text{ MHz/GPa}$ ^[38]; (d) 自旋相干时间 T_2 在 25 GPa 范围内都很稳定^[38]

Fig. 3. Influence of pressure on the optical and spin properties of the V_{Si} centers: (a) Room temperature photoluminescence spectra of the V_{Si} centers at three representative pressures^[38]; (b) ODMR spectra at three different pressures with zero external magnetic field. The solid lines represent Lorentzian fits^[38]; (c) within a pressure range of 27 GPa, D increases linearly with a coefficient of $(0.31 \pm 0.01) \text{ MHz/GPa}$ ^[38]; (d) T_2 exhibits remarkable stability over a wide pressure range of 25 GPa^[38].

为量子器件的集成提供了理想平台. Wang 等^[38]研究了 4 H-SiC 砧面经离子注入形成的硅空位色心的光学与自旋性质, 该色心表现出单轴对称且与温度无关的零场分裂特性. 如图 3(a) 所示, 光致发光光谱随压力增加发生蓝移; 同时, 如图 3(b), (c) 所示, 高压下共振频率向更高频率移动, 零场分裂参数 D 以 $(0.31 \pm 0.01) \text{ MHz/GPa}$ 的斜率线性增加, 这与高压下色心的电子结构重排和波函数分布变化相关. 此外, 较小的斜率有利于在较大的压力范围内直接观测 ODMR 信号的位移. 如图 3(d) 所示, 自旋相干时间 T_2 在 25 GPa 范围内保持稳定, 为高压下动态磁涨落测量奠定了基础. 相较于传统高压磁探测技术, 基于硅空位色心的量子传感可实现微米级空间分辨率, 为对顶砧高压装置中的微区原位磁探测研究提供了新的选择.

2.3 高压下碳化硅双空位色心的性质

高压环境对 4H-SiC 中双空位色心的光学与自旋性质也产生了显著调控^[37], 双空位 PL5/PL6 的

零声子线 (ZPL) 随压力增加呈现蓝移. 在常压下的共振频率约为 1376 MHz, 而在 14.2 和 33.9 GPa 时的共振频率分别为 1727.7 MHz 和 2222.1 MHz. 在较高的压力下, ODMR 峰逐渐变宽, 这是由于高压下的轻微晶体变形; 零场分裂参数 D 随压力线性增加, PL5 的斜率高达 $(25.1 \pm 0.2) \text{ MHz/GPa}$, PL6 为 11.8 MHz/GPa , 这与碳化硅晶格压缩导致的局部自旋密度重分布和原子间距减小直接相关. 利用双空位色心 PL5 能实现 $0.28 \text{ MPa/Hz}^{1/2}$ 的原位压力传感. 此外, 科研人员还研究了其自旋相干时间. 如图 4(d) 所示, PL5 的自旋相干时间在 36 GPa 范围内, T_2 从 $18.9 \mu\text{s}$ 下降至 $0.9 \mu\text{s}$.

2.4 高压下六方氮化硼 V_B 色心的性质

三维的金刚石和碳化硅色心高压量子传感器都在对顶砧台面上和待测样品的距离较远, 而且难以和二维材料样品进行异质集成, 因此人们开始研究氮化硼色心高压量子传感技术. 六方氮化硼作为二维层状材料, 存在于薄 hBN 层中的 V_B 色心可

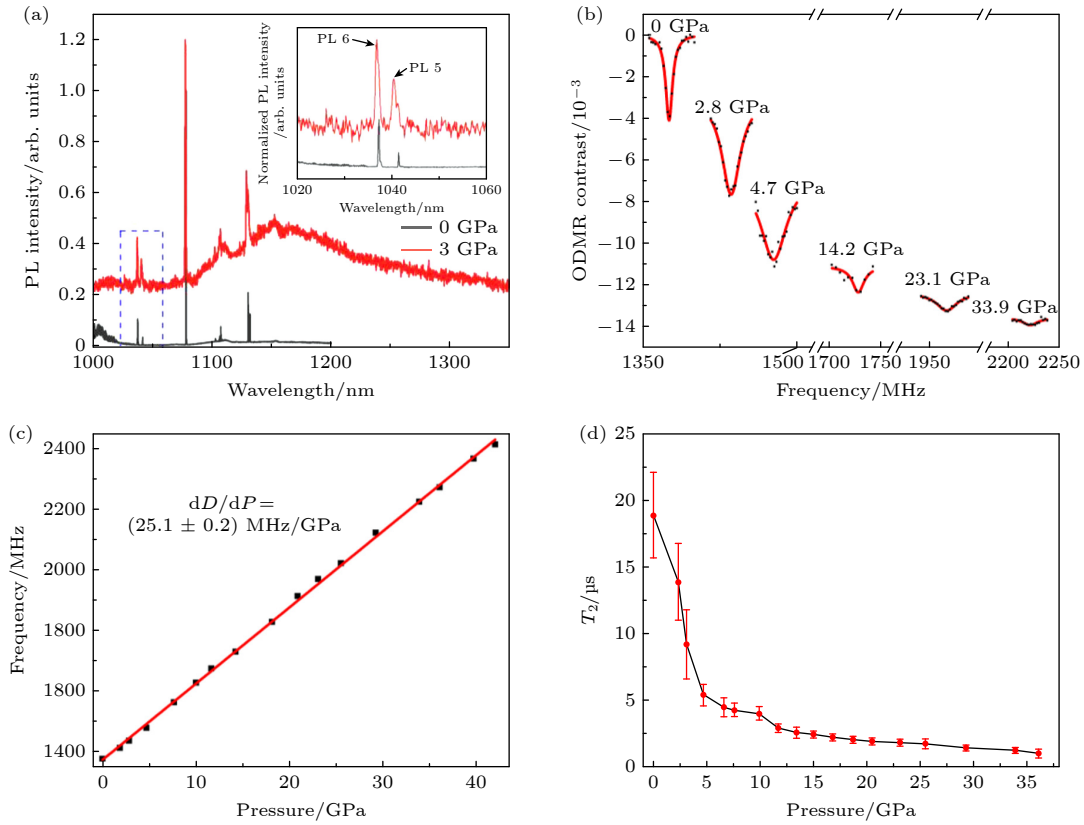


图 4 高压对碳化硅双空位 $V_{Si}V_C$ 光学和自旋性质的影响 (a) 25 K 双空位的低温下荧光光谱, 可以看出 ZPL 随压力增加呈现蓝移^[37]; (b) 在零磁场下不同压力下 PL5 的 ODMR 谱 (黑点). 红色曲线是使用洛伦兹函数的拟合^[37]; (c) 测量的 PL5 的零场分裂 (ZFS) 参数随着压力的增加而线性增加, 斜率为 25.1 MHz/GPa^[37]; (d) 测量的 PL5 的自旋相干时间 T_2 随压力的变化^[37]

Fig. 4. Influence of pressure on the optical and spin properties of the $V_{Si}V_C$ centers: (a) Low-temperature fluorescence spectra of divacancy at 25 K, the ZPL of PL5 has a small blueshift^[37]; (b) several representative ODMR spectra (black dots) at different pressures under zero magnetic field. The red curves are the fits using the Lorentz functions^[37]; (c) measured ZFS parameter increases linearly as the pressure increases with a slope of 25.1 MHz/GPa^[37]; (d) measured spin coherence time T_2 as a function of pressure^[37].

以容易地集成到范德瓦耳斯异质结构中, 从而降低硼空位色心和待测二维材料的距离, 为二维纳米传感器等量子器件集成提供了优异的平台^[44]. 如图 5 所示, 高压环境显著调控 hBN 中 V_B^- 色心的光学与自旋特性. 色心光谱随压力增加呈现明显展宽, 荧光强度也随压力下降; 同时我们看到共振峰随着压力的增加向更高的频率移动, 零场分裂参数 D 以 (48 ± 1) MHz/GPa 的斜率线性增加, 接近金刚石 NV 色心的 3 倍, 有望应用于高灵敏度的原位压强传感, 并有望结合宽场成像技术, 进而实现压强分布的高空间分辨率成像^[45]. 同时还发现其 ODMR 在 3 GPa 以上由于对比度降低而消失. 此外, 人们还测量了高压下氮化硼硼空位色心的自旋晶格弛豫时间 $T_1 = (5.1 \pm 0.1)$ μ s. 当压力升高时, T_1 没有明显的变化, 而对比度强烈地减小并在 3 GPa 以上难以探测, 该结果与 ODMR 的观测一致.

表 1 系统对比了四种常见固态色心的高压传

感性能, 为核心量子传感器选型提供了关键参数依据. 该表格系统对比了四种自旋色心体系的高压传感性能参数, 其中 hBN 中的 V_B^- 色心具有最高的压致频移系数 (57.4 MHz/GPa), 其灵敏度达到 $(0.32 \text{ MPa}/\text{Hz}^{1/2})$, 但其最大工作压力仅为 4.7 GPa; 金刚石 NV 色心虽压致频移系数较低 (7.24 MHz/GPa), 却能耐受 130 GPa 的极端高压, 表现出最优的稳定性; 两种碳化硅色心中, $V_{Si}V_C$ 色心在频移系数 (25.1 MHz/GPa) 和最高工作压力 (42 GPa) 上均显著优于 V_{Si} 色心 (0.31 MHz/GPa, 27 GPa), 且在灵敏度 $(0.28 \text{ MPa}/\text{Hz}^{1/2})$ 方面表现最佳.

3 高压下磁性材料原位量子磁探测

压致磁性相变作为凝聚态物理学和材料科学的重要研究方向, 通过压力这一纯物理调控手段,

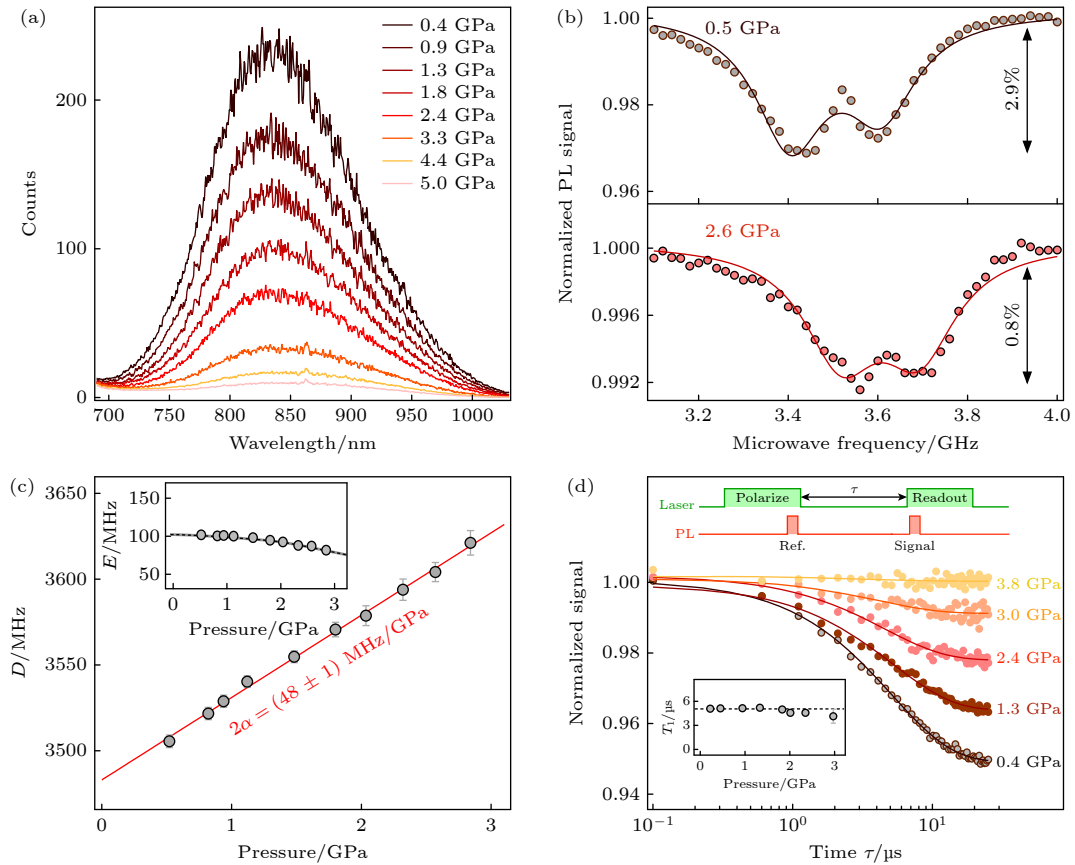


图 5 高压下 hBN 中 V_B^- 色心的光学和自旋性质 (a) 在不同压力下的 V_B^- 色心的光致发光谱^[46]; (b) 在 0.5 和 2.6 GPa 下测量的 ODMR 谱. 实线是用洛伦兹函数拟合^[46]; (c) 零场分裂参数 D 随压力的变化. 插图: E 参数随压力的变化^[46]; (d) 使用顶部所示自旋晶格弛豫时间的脉冲序列在不同压力下测量的自旋晶格弛豫时间. 插图: 自旋弛豫时间 T_1 与压力的关系^[46]

Fig. 5. Optical properties and spin properties of V_B^- centers in hBN under hydrostatic pressure: (a) Series of PL spectra at different pressures^[46]; (b) ODMR spectra recorded at 0.5 GPa (top) and 2.6 GPa (bottom). The solid lines are data fitting with Lorentzian functions^[46]; (c) zero-field splitting parameter D as a function of P . Inset: Evolution of the E -splitting parameter with P ^[46]; (d) optically-detected spin relaxation curves recorded at different pressures using the experimental pulse sequence shown on top. Inset: Evolution of the spin relaxation time T_1 with P ^[46].

表 1 几种固态色心的压力传感性能比较^[45]

Table 1. Comparison of the pressure sensing performance among several solid-state color centers^[45].

色心类型	dD/dP (MHz·GPa ⁻¹)	$\eta(P)$ /(MPa·Hz ^{-1/2})	P_{\max} /GPa	特性
氮化硼硼空位色心 ^[45,46]	57.4	0.32	4.7	易与二维材料贴合
金刚石NV色心 ^[35]	7.24	>0.6	130	工作压力强可至百GPa
碳化硅硅空位色心 ^[38]	0.31	0.5	27	在压机中可实现更大的样品腔体积且零场分裂与温度无关
碳化硅双空位色心 ^[37]	25.1	0.28	42	便于进行压力传感

实现了对材料磁特性的精确调控. 近年来, 随着实验技术的进步和理论模型的完善, 研究人员在多种材料体系中发现了丰富的压致磁性相变现象, 揭示了多种新奇微观机制. 传统磁探测方法难以原位探测对顶砧腔体内的磁性材料的压致磁性相变, 因此急需固态色心等量子方法原位探测高压下磁性材料的压致磁性相变. 首先介绍其在传统磁性材料原位探测的进展. Wang 等^[38] 利用碳化硅台面上的浅

层硅空位色心, 结合光探测磁共振技术, 实现了不同压力下 $Nd_2Fe_{14}B$ 材料磁相变过程的精确探测. 图 6(a) 展示了压缩过程中探测位置与参考位置的典型信号, 扣除因压力导致的零场分裂参数的整体移动后, 探测位置的 ODMR 共振频率在 5.1 GPa 以内保持相对稳定. 而当压力升至 6.7 GPa 时, 共振频率突然向高频方向偏移. 图 6(b) 呈现了 $Nd_2Fe_{14}B$ 样品在加压与卸压过程中的磁场变化规律: 压力增

至约 6 GPa 时, 样品磁场与 ODMR 频率均维持恒定; 当压力进一步升高至约 8 GPa 时, 磁场急剧下降. 这一现象表明, 样品在约 7 GPa 压力下发生可逆相变, 从铁磁相转变为顺磁相. Lesik 等^[32]借助 (100) 晶向的金刚石 NV 色心, 报道了一种基于成像的空间分辨光学磁测量方法, 在 20.0 GPa 压力下采集了数据重建的矢量磁场. 对单质铁颗粒开展磁场测量, 系统地探究了 0—30 GPa 压力范围内其磁学性质的演变规律, 成功观测到压力诱导的单

质铁磁性相变过程. 如图 6(c) 所示, 磁化强度随压力增加呈现规律性变化; 当压力达到 15 GPa 时, 铁颗粒的磁场强度开始显著减弱, 至约 30 GPa 时, 变成顺磁态. 此外, Wang 等^[35]以磁铁矿 (Fe_3O_4) 颗粒为研究对象, 在 130 GPa 超高压下实现了约 $1 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ 的磁探测灵敏度. 他们利用 ODMR 磁成像方法 (图 6(d)—(i)), 揭示了 Fe_3O_4 在高压下磁性材料的磁畴结构演变. 实验发现, 随压力升高, Fe_3O_4 经历三个特征性磁相变: 30 GPa 附近从

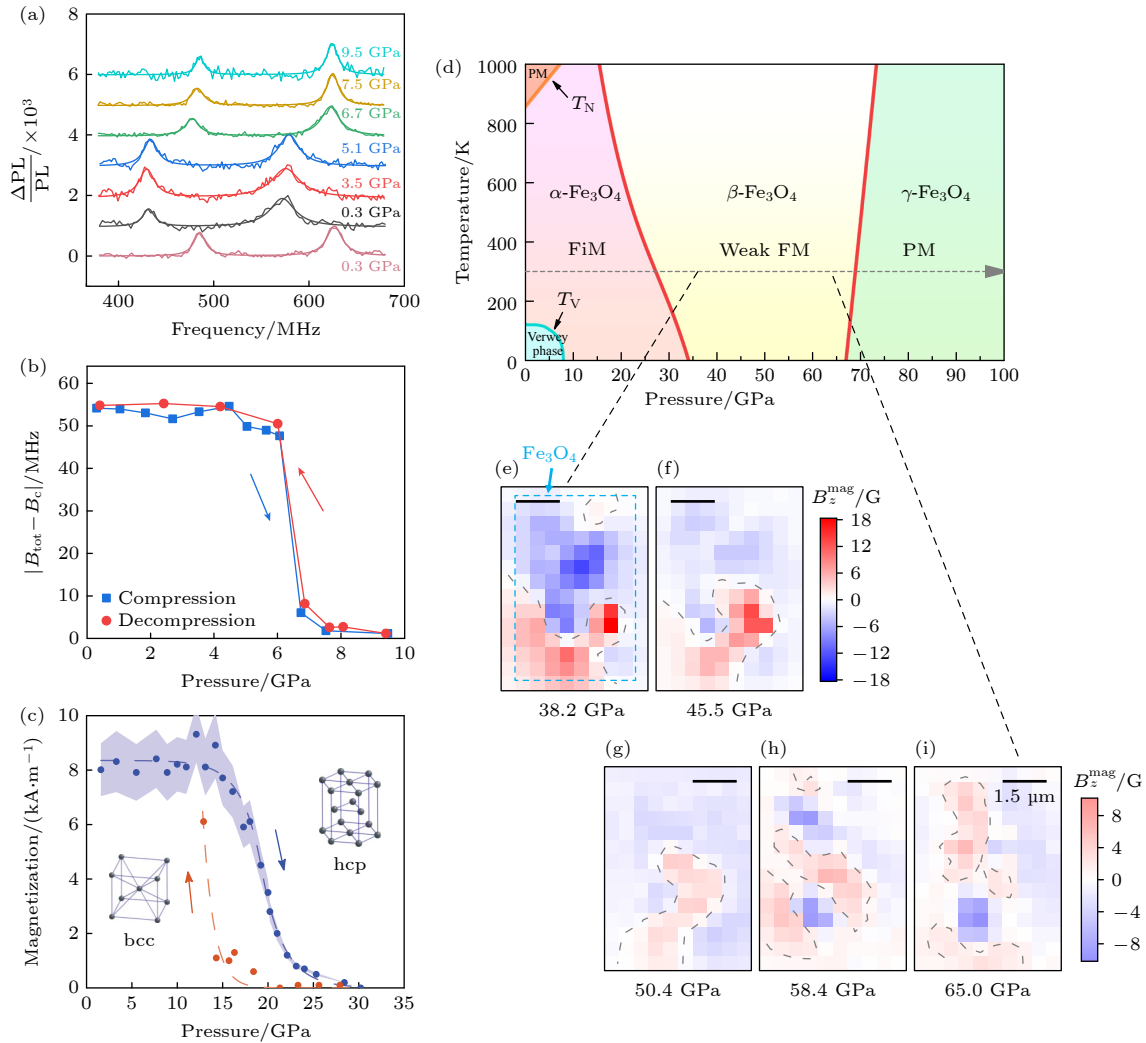


图 6 高压下原位探测传统磁性材料 (a) 利用浅层碳化硅空位色心研究 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁体的压致磁性相变, 图中是不同压力下的 ODMR 谱^[38]; (b) 利用 V_{Si} 色心在加压和降压过程中测量的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 样品的磁性相变^[38]; (c) 浅层金刚石 NV 色心测量铁的压致磁性相变, 蓝色是加压, 红色是降压^[32]; (d) 浅层金刚石 NV 色心测量 Fe_3O_4 的压致磁性相变图^[35]; (e)—(i) 测得的 Fe_3O_4 样品在不同压力下的磁成像结果^[35]

Fig. 6. Detection of the pressure-induced magnetic phase transition of conventional magnetic materials: (a) Detection of the pressure-induced magnetic phase transition of a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ magnet using shallow V_{Si} centers. The figure shows ODMR spectra at different pressures^[38]; (b) the inferred magnetic fields of the $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ sample were measured using V_{Si} centers during the compression and decompression processes^[38]; (c) observation of the a-e transition of iron at each pressure using shallow V_{Si} centers. The data obtained during the pressure increase are shown by blue dots and those obtained during the pressure release are shown by red dots^[32]; (d) observation of the a-e transition of Fe_3O_4 at each pressure using shallow V_{Si} centers^[35]; (e)—(i) magnetic field imaging of the surface of Fe_3O_4 with an external magnetic field of ~ 240 G at different pressures, respectively^[35].

亚铁磁相 ($\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$) 转变为弱铁磁相 ($\beta\text{-Fe}_3\text{O}_4$), 70 GPa 时进一步转变为顺磁相 ($\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$). 上述研究将基于 NV 色心的磁测量技术拓展至百 GPa 压力范围, 为定量分析极端高压下的磁性奠定了基础.

近年来, 高压技术的持续发展推动了新型相变材料的发现与研究. 其中, 范德瓦耳斯 (vdW) 磁性材料凭借独特的层间弱耦合特性, 成为二维磁序调控及原子级自旋器件设计的理想平台. Mu 等^[46] 以 hBN 中硼空位色心作为量子传感器, 在高压环境下实现了范德瓦耳斯异质结的亚微米空间分辨率磁成像. 通过 ODMR 技术, 该工作在高压环境下达到了约 $800 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ 的磁场灵敏度. 如图 7(a) 所示, 当压力增至 1 GPa 时, CrTe_2 的边缘杂散磁场几乎完全消失. 研究表明, 这种磁性减弱源于压力对晶体结构的调控: 压力使 Cr—Te—Cr 键角偏离 90° 理想构型, 进而削弱超交换相互作用. Yu 等^[44] 利用 hBN 中硼空位 ODMR 实现了 Fe_3GeTe_2 相变过程中面外磁场分量 B_z 的高精度测量 (图 7(b)),

在 0.7 GPa 压力下观测到样品发生顺磁-铁磁转变的居里温度约为 210 K, 与已有研究结果一致, 验证了该技术在高压下探测二维材料磁性的有效性. He 等^[47] 基于 hBN 硼空位色心, 成功实现了高压环境下 $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$ 二维铁磁材料应力与磁性的原位探测. 如图 7(c) 所示, 随着压力增加, 磁有序状态逐渐被抑制, 具体表现为杂散磁场强度呈梯度下降; 当压力达到 0.5 GPa 临界点时, 磁场信号完全淬灭, 标志着 $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$ 材料从铁磁态转变为非磁性相. 此外通过多点测量实现应力场重建的可能性, V_B 缺陷的 ZFS 对平面应力分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 高度敏感, 将含 V_B 缺陷的 hBN 薄片直接集成在金刚石压砧的砧面上, 通过扫描相应位置并在每个点采集 ODMR 信号, 从而获取多个空间点的 ZFS 数据, ZFS 随压力的变化即可反演局部应力值. Hsieh 等^[31] 通过将 NV 色心作为纳米级量子传感器集成到金刚石压砧的砧面中, 利用二维 NV 磁共振图重建样品产生的全矢量磁场. 在铁样品的实验中, 通过扫

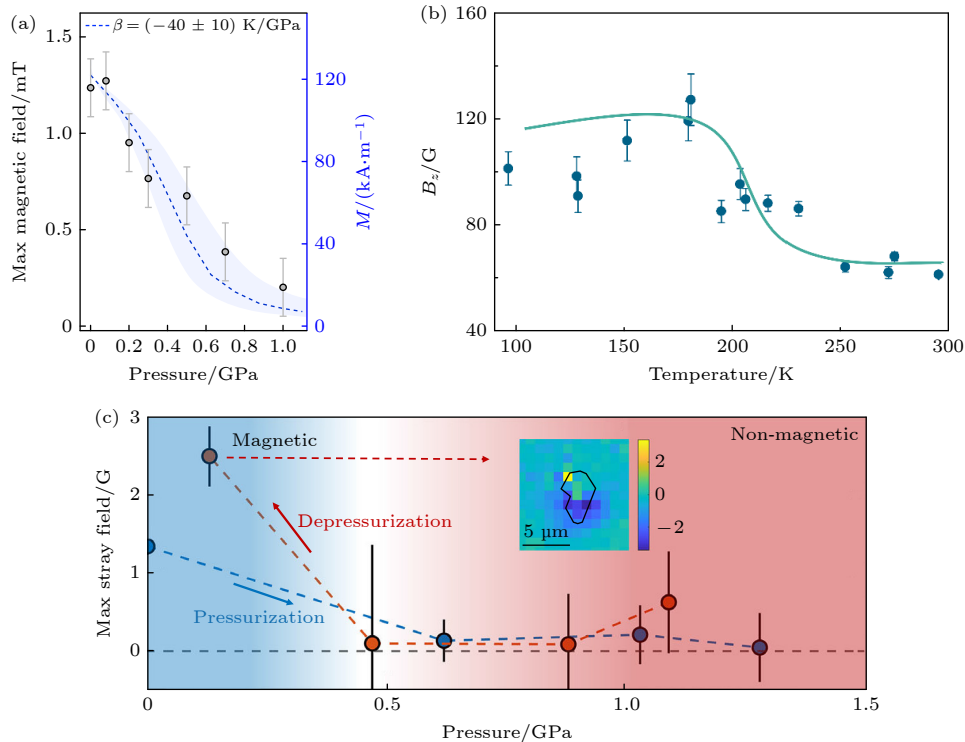


图 7 高压下原位探测二维磁性材料 (a) 利用氮化硼硼空位色心测得的 CrTe_2 样品边缘处测得的最大磁场随压力变化的关系^[46]; (b) 通过氮化硼硼空位色心测量的垂直于 Fe_3GeTe_2 表面的磁场强度随温度变化曲线^[44]; (c) $\text{Cr}_{1+\delta}\text{Te}_2$ 最大杂散磁场随压力的演化曲线, 蓝色和红色数据点分别对应加压和降压过程^[47]

Fig. 7. Detection of the pressure-induced magnetic phase transition of two-dimensional magnetic materials: (a) Maximum magnetic field measured at the edges of the CrTe_2 flake as a function of pressure using boron vacancy centers in hexagonal boron nitride^[46]; (b) the temperature-dependent changes in the magnetic field magnitude perpendicular to the surface of Fe_3GeTe_2 , measured using V_B centers^[44]; (c) evolution of the maximum stray magnetic field difference as a function of pressure, with data showing pressurization (blue) and depressurization (red) cycles^[47].

描砧面区域, 获取 ODMR 图谱后, 利用点偶极子模型拟合样品产生的磁场分布, 从而反推出样品的磁矩矢量.

4 高压超导材料研究

超导的两大核心特性是零电阻特性和完全抗磁性 (迈斯纳效应), 这两个特性共同定义了超导态. 压力通过晶格压缩效应改变电子结构和相互作用强度, 成为探索新型超导态不可或缺的研究手段. 压力具有双重调控优势: 一方面能精确调节费米

面处态密度与电子关联强度这两个决定超导临界温度 (T_c) 的关键参数; 另一方面可有效抑制竞争序, 为超导相的涌现创造有利条件. 然而传统高压磁探测方法难以原位探测超导的迈斯纳效应, 而固态色心已经成为高压下探测超导的量子平台^[48]. 如图 8(a) 所示, Yip 等^[33] 创新采用微米金刚石中 NV 色心借助 ODMR 技术探测了铁基超导 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})_2$ 不同压力下的临界温度. 如图 8(a) 所示, ODMR 谱线分裂在 17 K 后显著增加、21 K 后趋平, 同步采集的交流磁化率在相同温度骤降, 与色心测得

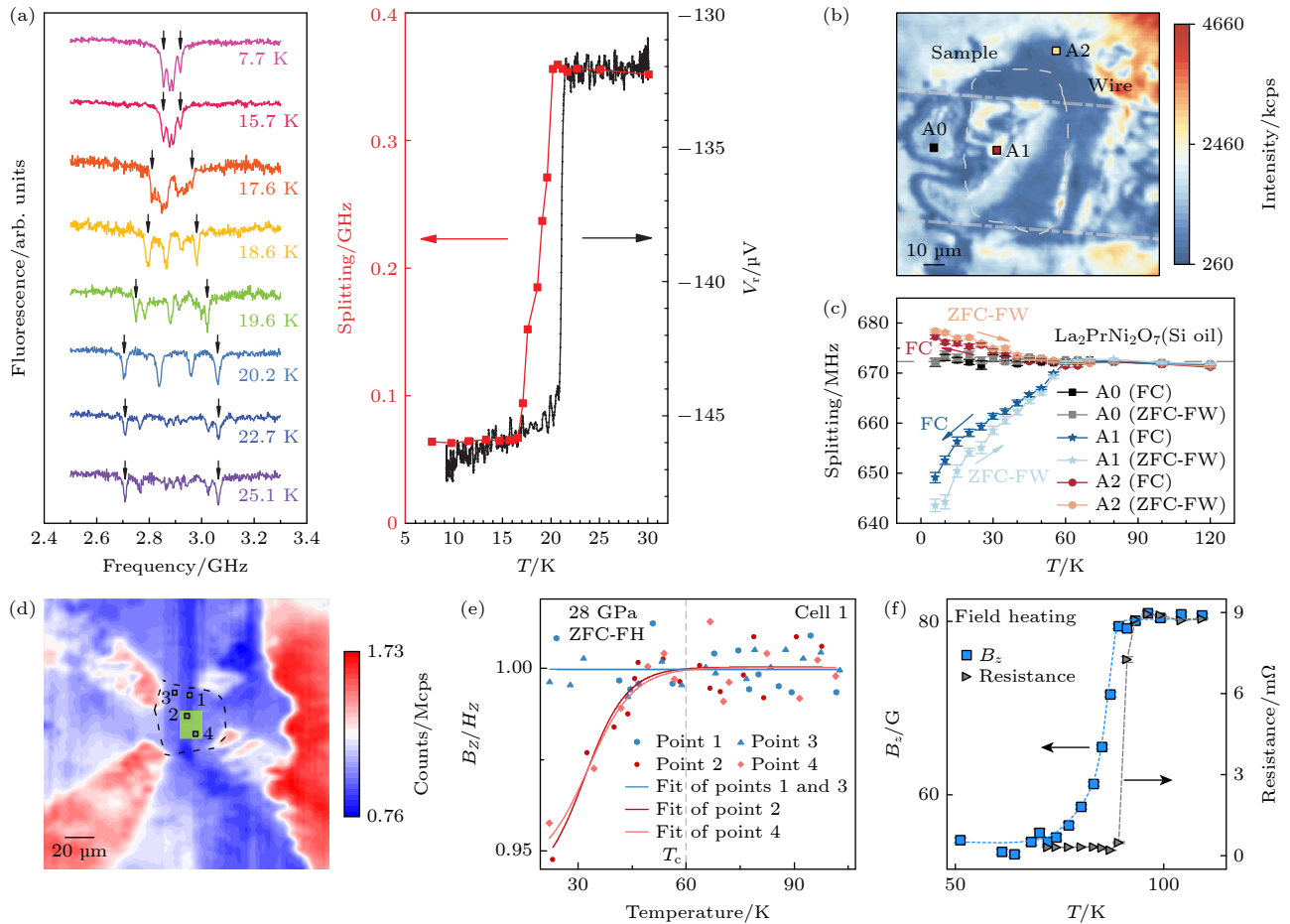


图 8 (a) 微米金刚石 NV 色心 ODMR 方法测得铁基超导的临界温度^[33]; (b), (c) $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 样品的共聚焦荧光扫描图, 选取多个位置进行迈斯纳效应探测. 其中 A1 位置利用 ODMR 方法测得了超导的迈斯纳抗磁效应^[52]; (d), (e) 28 GPa 压力下 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ 样品的局域抗磁性测量结果^[36]. 28 GPa 下样品的荧光共聚焦扫描图像, 根据样品相对位置选取四个检测点 (1, 2, 3, 4), 其中位置 1, 3 没有观测到迈斯纳抗磁性, 位置 2, 4 观测到迈斯纳抗磁性; (f) 高压下 CeH_9 超导迈斯纳效应的实验测量^[34]. 蓝色是 NV 色心测的迈斯纳抗磁性, 黑色是四电极法测的零电阻, 可以看出两种方法测得结果是一致的

Fig. 8. (a) ODMR spectra of NV centers in iron-based superconductors at critical temperature^[33]; (b), (c) fluorescence image of $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ with multi-point meissner effect measurements. The superconducting diamagnetic response was detected at position A1 using ODMR^[52]; (d), (e) local diamagnetism of the $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ sample at 28 GPa. Fluorescence scanning confocal image of the corresponding sample at 28 GPa, four points (1, 2, 3, 4) are selected based on their positions with respect to the $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ sample. No Meissner diamagnetism was observed at positions 1 and 3, while positions 2 and 4 exhibit clear Meissner shielding^[36]; (f) direct observation of the Meissner effect in high-pressure CeH_9 superconductors via quantum magnetometry^[34]. The blue curve shows diamagnetic shielding from NV center measurements, while the black curve displays zero resistance measured via four-terminal method. Both methods yield consistent results.

的 T_c 高度吻合. 镍基超导的研究是当前国际科学界的前沿热点, 可以深入地理解高温超导电子配对的核心机制. 2019 年, 首次在镍基薄膜中观测到超导电性^[49]. 2023 年, 中国科学家相继在 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 以及 $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 中, 发现高压诱导的超导电性, 超导转变温度突破液氮温区^[50,51]. 如图 8(b) 和图 8(c) 所示, Wen 等^[52] 用 (111) 晶向金刚石浅层 NV 色心测量了场冷和零场冷情况下 2 种镍基超导 $\text{La}_2\text{PrNi}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ 高压下迈斯纳效应. 如图 8(d) 和图 8(e) 所示, Liu 等^[36] 对 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ 的研究揭示了超导迈斯纳效应的证据: 超导区域 (测点 2, 4) 有迈斯纳抗磁性, 非超导区域 (测点 1, 3) 没有迈斯纳抗磁性, 证实微观尺度 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7-\delta}$ 样品的超导非均匀性. 氢化物是室温超导探索的突破点, 虽已发现十余种高压超导氢化物, 但是百 GPa 的超高压严重限制了传统手段测量其迈斯纳效应. Bhattacharyya 等^[34] 采用 (111) 晶向金刚石台面上浅层 NV 色心在 140 GPa 下, 利用 ODMR 方法首次实现氢化物 CeH_9 空间分辨的迈斯纳抗磁效应. 而且和电阻法测的零电阻的结果一致, 证明了固态色心在探测超高压下氢化物超导方面的能力.

5 结 论

本文总结了高压极端条件下多种固态色心体系包括金刚石 NV 色心、碳化硅 V_{Si} 和 $\text{V}_{\text{Si}}\text{V}_{\text{C}}$ 色心以及六方氮化硼 V_{B} 色心高压下的光学和自旋性质, 还总结了它们在高压下原位量子磁探测的研究进展: 尤其是在新型二维磁性材料的压致磁性相变探测以及新型超导如镍基超导和氢化物超导的迈斯纳效应的探测方面取得了一系列重要进展. 总体而言, 基于固态色心自旋的高压原位量子磁探测技术, 已成功突破传统高压磁探测技术在空间分辨率与探测灵敏度上的固有局限, 为极端条件下材料新奇物性、相变行为及量子现象的探索提供了强有力的新型研究工具. 该技术实现了高压环境下微米尺度磁场、压强等物理量的精密测量, 推动了高压物理学、凝聚态物理与量子技术的研究前沿.

当前固态色心高压原位磁探测技术的发展, 仍受限于极端环境与量子传感特性的耦合瓶颈: 一是空间兼容性差, 对顶砧微米级样品腔对微波天线、光学器件尺寸要求严苛, 商用器件难适配; 二是信噪比受限, 传压介质 (如 KBr、惰性气体) 散射增强

背景噪声, 压力梯度致色心光谱展宽, 模糊磁信号, 降低磁场测量精度; 三是稳定性难控, 微波与激光在对顶砧内产生热累积, 引发压力漂移及色心自旋信号, 百 GPa 高压下热扰动对探测重复性影响更显著.

展望未来, 固态色心高压原位磁探测技术, 将沿性能突破-场景拓展推进: 性能上, 集成金刚石 NV 和碳化硅 V_{Si} 色心, 结合高灵敏度与宽温适配性拓宽探测区间, 色心阵列搭配大孔径共聚焦系统, 将空间分辨率进一步提升, 对于观测磁畴等非常重要; 场景上, 搭建超低温对顶砧, 实现 4 K 以下极低温与百 GPa 高压协同, 助力强关联量子物态研究, 为未来量子精密测量和凝聚态物理的交叉领域的研究奠定坚实的基础.

参考文献

- [1] Mao H K, Chen X J, Ding Y, Li B, Wang L 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015007
- [2] Dias R P, Silvera I F 2017 *Science* **355** 715
- [3] Salzmann C G 2019 *J. Chem. Phys.* **150** 060901
- [4] Laniel D, Winkler B, Fedotenko T, Pakhomova A, Chariton S, Milman V, Prakapenka V, Dubrovinsky L, Dubrovinskaja N 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 216001
- [5] Bhoi D, Gouchi J, Hiraoka N, Zhang Y, Ogita N, Hasegawa T, Kitagawa K, Takagi H, Kim K H, Uwatoko Y 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 217203
- [6] Scharf G, Guterding D, Hen B, Sarte P M, Ortiz B R, Rozenberg G K, Holder T, Wilson S D, Jeschke H O, Ron A 2025 *Phys. Rev. Res.* **7** 013127
- [7] Cai W, Sun H, Xia W, Wu C, Liu Y, Liu H, Gong Y, Yao D X, Guo Y, Wang M 2020 *Phys. Rev. B* **102** 144525
- [8] Zhang C, Gu Y, Wang L, Huang L L, Fu Y, Liu C, Wang S, Su H, Mei J W, Zou X, Dai J F 2021 *Nano Lett.* **21** 7946
- [9] Han W, Feng J, Dong H, Cheng M, Yang L, Yu Y, Du G, Li J, Du Y, Zhang T, Wang Z, Chen B, Shi J, Chen Y 2024 *Nano Lett.* **24** 966
- [10] Gati E, Inagaki Y, Kong T, Cava R J, Furukawa Y, Canfield P C, Bud'ko S L 2019 *Phys. Rev. B* **100** 094408
- [11] Valenta J, Kratochvílová M, Míšek M, Carva K, Kaštil J, Doležal P, Opletal P, Čermák P, Proschek P, Uhlířová K, Prchal J, Coak M J, Son S, Park J G, Sechovský V 2021 *Phys. Rev. B* **103** 054424
- [12] Drozdov A P, Erements M I, Troyan I A, Ksenofontov V, Shylin S I 2015 *Nature* **525** 73
- [13] Somayazulu M, Ahart M, Mishra A K, Geballe Z M, Baldini M, Meng Y, Struzhkin V V, Hemley R J 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 027001
- [14] Jackson D D, Aracne-Ruddle C, Malba V, Weir S T, Catledge S A, Vohra Y K 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2467
- [15] Marizy A, Guigue B, Occelli F, Leridon B, Loubeyre P 2017 *High Pressure Res.* **37** 465
- [16] 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
- [17] Grinolds M S, Hong S, Maletinsky P, Luan L, Lukin M D, Walsworth R L, Yacoby A 2013 *Nat. Phys.* **9** 215
- [18] 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
- [19] Thiel L, Wang Z, Tschudin M A, Rohner D, Gutierrez-Lezama I, Ubrig N, Gibertini M, Giannini E, Morpurgo A F, Maletinsky P 2019 *Science* **364** 973
- [20] Sun Q C, Song T, Anderson E, Brunner A, Forster J, Shalomayeva T, Taniguchi T, Watanabe K, Grafe J, Stohr R, Xu X, Wrachtrup J 2021 *Nat. Commun.* **12** 1989
- [21] Dong Y, Du B, Zhang S C, Chen X D, Sun F W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 160301 (in Chinese) [董杨, 杜博, 张少春, 陈向东, 孙方稳 2018 物理学报 **67** 160301]
- [22] Koehl W F, Buckley B B, Heremans F J, Calusine G, Awschalom D D 2011 *Nature* **479** 84
- [23] Mu Z, Zargaleh S A, von Bardeleben H J, Fröch J E, Nonahal M, Cai H, Yang X, Yang J, Li X, Aharonovich I, Gao W 2020 *Nano Lett.* **20** 6142
- [24] Wang J F, Yan F F, Li Q, Liu Z H, Cui J M, Liu Z D, Galli A, Xu J S, Li C F, Guo G C 2021 *Nat. Commun.* **12** 3223
- [25] Chen X, Luo Q Y, Guo P J, Zhou H J, Hu Q C, Wu H P, Shen X W, Cui R Y, Dong L, Wei T X, Xiao Y H, Li D, Lei L, Zhang X, Wang J F, Xiang G 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2413529
- [26] Gottscholl A, Kianinia M, Soltamov V, Orlinskii S, Mamin G, Bradac C, Kasper C, Krambrock K, Sperlich A, Toth M, Aharonovich I, Dyakonov V 2020 *Nat. Mater.* **19** 540
- [27] Gottscholl A, Diez M, Soltamov V, Kasper C, Sperlich A, Kianinia M, Bradac C, Aharonovich I, Dyakonov V 2021 *Sci. Adv.* **7** eabf3630
- [28] Gottscholl A, Diez M, Soltamov V, Kasper C, Krausse D, Sperlich A, Kianinia M, Bradac C, Aharonovich I, Dyakonov V 2021 *Nat. Commun.* **12** 4480
- [29] Huang M, Zhou J, Chen D, Lu H, McLaughlin N J, Li S, Alghamdi M, Djugba D, Shi J, Wang H, Du C R 2022 *Nat. Commun.* **13** 5369
- [30] Healey A J, Scholten S C, Yang T, Scott J A, Abrahams G J, Robertson I O, Hou X F, Guo Y F, Rahman S, Lu Y, Kianinia M, Aharonovich I, Tetienne J P 2023 *Nat. Phys.* **19** 87
- [31] Hsieh S, Bhattacharyya P, Zu C, Mittiga T, Smart T J, Machado F, Kobrin B, Hohn T O, Rui N Z, Kamrani M, Chatterjee S, Choi S, Zaletel M, Struzhkin V V, Moore J E, Levitas V I, Jeanloz R, Yao N Y 2019 *Science* **366** 1349
- [32] Lesik M, Plisson T, Toraille L, Renaud J, Occelli F, Schmidt M, Salord O, Delobbe A, Debuisschert T, Rondin L, Loubeyre P, Roch J F 2019 *Science* **366** 1359
- [33] Yip K Y, Ho K O, Yu K Y, Chen Y, Zhang W, Kasahara S, Mizukami Y, Shibauchi T, Matsuda Y, Goh S K, Yang S 2019 *Science* **366** 1355
- [34] Bhattacharyya P, Chen W, Huang X, Chatterjee S, Huang B, Kobrin B, Lyu Y, Smart T J, Block M, Wang E, Wang Z, Wu W, Hsieh S, Ma H, Mandyam S, Chen B, Davis E, Geballe Z M, Zu C, Struzhkin V, Jeanloz R, Moore J E, Cui T, Galli G, Halperin B I, Laumann C R, Yao N Y 2024 *Nature* **627** 73
- [35] Wang M Q, Wang Y, Liu Z X, Xu G Y, Yang B, Yu P, Sun H Y, Ye X Y, Zhou J W, Goncharov A F, Wang Y, Du J F 2024 *Nat. Commun.* **15** 8843
- [36] Liu L, Guo J N, Hu D Y, Yan G Z, Chen Y Z, Yu L X, Wang M, Liu X D, Huang X L 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 096001
- [37] Liu L, Wang J F, Liu X D, Xu H A, Cui J M, Li Q, Zhou J Y, Lin W X, He Z X, Xu W, Wei Y, Liu Z H, Wang P, Hao Z H, Ding J F, Li H O, Liu W, Li H, You L, Xu J S, Gregoryanz E, Li C F, Guo G C 2022 *Nano Lett.* **22** 9943
- [38] Wang J F, Liu L, Liu X D, Li Q, Cui J M, Zhou D F, Zhou J Y, Wei Y, Xu H A, Xu W, Lin W X, Yan J W, He Z X, Liu Z H, Hao Z H, Li H O, Liu W, Xu J S, Gregoryanz E, Li C F, Guo G C 2023 *Nat. Mater.* **22** 489
- [39] Du J F, Shi F Z, Kong X, Jezek F, Wrachtrup J 2024 *Rev. Mod. Phys.* **96** 025001
- [40] Hamlin J J, Zhou B B 2019 *Science* **366** 1312
- [41] Doherty M W, Struzhkin V V, Simpson D A, McGuinness L P, Meng Y, Stacey A, Karle T J, Hemley R J, Manson N B, Hollenberg L C, Prawer S 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 047601
- [42] Dai J H, Shang Y X, Yu Y H, Xu Y, Yu H, Hong F, Yu X H, Pan X Y, Liu G Q 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 117601
- [43] Christle D J, Falk A L, Andrich P, Klimov P V, Hassan J U, Son Nguyen T, Janzén E, Ohshima T, Awschalom D D 2014 *Nat. Mater.* **14** 160
- [44] Yu L X, Guo N J, Liu L, Liu W, Yan G Z, Cui J M, Tang J S, Li C F, Liu X D 2025 arXiv: 2501.13757 [cond-mat.mes-hall]
- [45] Zhong C, Mai D, Wang Y P, Wang H, Dai R C, Wang Z P, Sun X Y, Zhang Z M 2025 *ACS Photonics* **12** 3717
- [46] Mu Z, Fraunié J, Durand A, Clément S, Finco A, Rouquette J, Hadj-Azzem A, Rougemaille N, Coraux J, Li J, Poirier T, Edgar J H, Gerber I C, Marie X, Gil B, Cassaboïs G, Robert C, Jacques V 2025 *Nat. Commun.* **16** 8574
- [47] He G H, Gong R T, Wang Z P, Liu Z Y, Hong J H, Zhang T X, Riofrio A L, Rehfuss Z, Chen M F, Yao C Y, Poirier T, Ye B T, Wang X, Ran S, Edgar J H, Zhang S X, Yao N Y, Zu C 2025 *Nat. Commun.* **16** 8162
- [48] Liu G Q 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 117601 (in Chinese) [刘刚钦 2025 物理学报 **74** 117601]
- [49] Li D F, Lee K, Wang B Y, Osada M, Crossley S, Lee H R, Cui Y, Hikita Y, Hwang H Y 2019 *Nature* **572** 624
- [50] Sun H L, Huo M W, Hu X W, Li J Y, Liu Z J, Han Y F, Tang L Y, Mao Z Q, Yang P T, Wang B S, Cheng J G, Yao D X, Zhang G M, Wang M 2023 *Nature* **621** 493
- [51] Wang N N, Wang G, Shen X L, Hou J, Luo J, Ma X P, Yang H X, Shi L F, Dou J, Feng J, Yang J, Shi Y Q, Ren Z A, Ma H M, Yang P T, Liu Z Y, Liu Y, Zhang H, Dong X L, Wang Y X, Jiang K, Hu J P, Nagasaki S, Kitagawa K, Calder S, Yan J Q, Sun J P, Wang B, Zhou R, Uwatoko Y, Cheng J G 2024 *Nature* **634** 579
- [52] Wen J Y, Xu Y, Wang G, He Z X, Chen Y, Wang N N, Lu T L, Ma X L, Jin F, Chen L C, Liu M, Fan J W, Liu X B, Pan X Y, Liu G Q, Cheng J, Yu X H 2025 *Nati. Sci. Rev.* **12** nwaf268

SPECIAL TOPIC—Principles and applications of quantum optics

Research progress of quantum magnetic sensing of solid-state color centers under high pressure^{*}

SUN Chengmei ZHONG Cheng DUAN Youyi
ZHOU Haojie WANG Junfeng[†]

(College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(Received 10 October 2025; revised manuscript received 7 November 2025)

Abstract

High-pressure science has emerged as one of the core frontiers for exploring novel states of matters and phenomena under extreme conditions. In high-pressure environments, the *in situ* detection of physical quantities such as magnetic fields and pressure is crucial for understanding material behaviors under extreme conditions. However, traditional high-pressure magnetic sensing techniques often face challenges such as low spatial resolution, poor sensitivity, and difficulties in achieving *in situ* magnetic detection.

In recent years, quantum sensors based on solid-state color centers, such as nitrogen-vacancy centers in diamond, silicon-vacancy/double-vacancy centers in silicon carbide, and color centers in hexagonal boron nitride, have enabled high-pressure quantum metrology with micrometer-scale spatial resolution, high sensitivity, and superior *in situ* detection capabilities, offering innovative solutions for high-pressure research.

This review systematically summarizes the effects of extreme high-pressure conditions on the optical and spin properties of these solid-state defects. Furthermore, taking high-pressure magnetic phase transition studies of magnetic materials and Meissner effect measurements in superconductors for example, we highlight recent advances in *in situ* magnetic sensing using solid-state color centers under high pressure. This review aims to provide technical guidance for developing high-pressure quantum precision measurement techniques based on solid-state defects in the future.

Keywords: high pressure, solid-state color centers, optically detected magnetic resonance, *in situ* magnetic detection

DOI: [10.7498/aps.75.20251370](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251370)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251370](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251370)

^{*} Project supported by the Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD0302100) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12474499).

[†] Corresponding author. E-mail: jfwang@scu.edu.cn

固态色心高压下量子磁探测研究进展

孙程美 仲成 段有意 周昊杰 王俊峰

Research progress of quantum magnetic sensing of solid-state color centers under high pressure

SUN Chengmei ZHONG Cheng DUAN Youyi ZHOU Haojie WANG Junfeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040705 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251370

CSTR: 32037.14.aps.75.20251370

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251370>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压下的色心磁共振和量子传感

Magnetic resonance and quantum sensing with color centers under high pressures

物理学报. 2025, 74(11): 117601 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250224>

高压下二维材料结构和光电性能研究进展

Recent progress of structures and photoelectric properties of two-dimensional materials under high pressure

物理学报. 2025, 74(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251034>

基于磁集聚效应的系综NV色心磁检测增强

Enhancement of magnetic detection by ensemble NV color center based on magnetic flux concentration effect

物理学报. 2021, 70(14): 147601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210129>

三角晶格自旋液体候选材料NaYbSe₂在高压下的超导转变

Pressure-induced superconductivity in triangular lattice spin liquid candidate NaYbSe₂

物理学报. 2023, 72(15): 157401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230730>

高压下HfS₂的光电性质

Photoelectric properties of HfS₂ under high pressure

物理学报. 2025, 74(17): 177801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250893>

高压下富氢高温超导体的研究进展

Progress on hydrogen-rich superconductors under high pressure

物理学报. 2021, 70(1): 017407 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202189>