

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.02.016

六方氮化硼中自旋缺陷性质的相干测量

张恒¹, 钱鹏², 伍鹏辉², 马钰²

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:六方氮化硼作为一种宽禁带二维半导体材料,能够容纳丰富的可光学寻址自旋缺陷,其中备受关注的硼空位缺陷在室温下表现出超高的荧光亮度和光学稳定性,且具有易操控的自旋结构,因此成为量子精密测量领域的热门方向。文章使用 532 nm 激光和共面波导微波辐射结构,实现硼空位缺陷的自旋态初始化和相干操控,在室温下探测到对比度较高的光探测磁共振(optically detected magnetic resonance, ODMR)谱,并研究了外磁场对电子自旋的影响;在此基础上,进一步通过测量 Rabi 振荡研究该缺陷的相干特性,并成功观测到核自旋的 ODMR 谱。文章实现了对六方氮化硼中硼空位自旋缺陷的基本性质测量和相干操控,为其在量子信息科学中的进一步应用打下了基础。

关键词:六方氮化硼;硼空位缺陷;光探测磁共振(ODMR);Rabi 振荡

中图分类号:O431.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)02-0242-06

Coherent measurement of spin defects properties in hexagonal boron nitride

ZHANG Heng¹, QIAN Peng², WU Penghui², MA Yu²

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Hexagonal boron nitride, as a wide bandgap two-dimensional semiconductor material, can accommodate a wealth of optically addressable spin defects. Among them, boron vacancy defects, which have attracted much attention, exhibit high fluorescence and optical stability at room temperature, with an easily manipulable spin structure, making them a popular direction in the field of quantum precision measurement. In this paper, a 532 nm laser and coplanar waveguide microwave radiation structure are used to achieve spin state initialization and coherent manipulation of boron vacancy defects. Optically detected magnetic resonance (ODMR) spectra with high contrast are detected at room temperature, and the influence of external magnetic field on electron spin is studied. On this basis, the coherence characteristics of the defects are further studied by measuring the Rabi oscillation and the ODMR spectra of the nuclear spin are successfully observed. In this paper, the detection of basic properties and coherent manipulation of boron vacancy spin defects in hexagonal boron nitride are realized, which lays the foundation for its further application in quantum information science.

Key words: hexagonal boron nitride; boron vacancy defect; optically detected magnetic resonance (ODMR); Rabi oscillation

固态量子传感利用自旋态的量子相干^[1]特性可以实现高精度的物理参量测量。三维宽禁带半

导体材料,例如金刚石中的氮空位(nitrogen-vacancy, NV)中心^[2]、碳化硅^[3]中的自旋缺陷等,被

收稿日期:2024-03-15;修回日期:2024-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11904070)

作者简介:张恒(1998—),男,江苏宿迁人,合肥工业大学硕士生;

钱鹏(1988—),男,甘肃张掖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: pqian@hfut.edu.cn.

广泛应用于各类量子传感^[4-6]技术中。金刚石和碳化硅稳定的三维块材结构能够保护嵌入在其内部的量子传感色心,但也造成色心与处于块材表面外的待测样品无法紧密接触,限制了测量精度。近几年在二维材料六方氮化硼中发现的自旋缺陷可以有效解决类似问题,获得前所未有的空间分辨率和灵敏度。该材料的原子级厚度也非常有利于形成异质结构,极容易与光电器件集成。目前这种自旋缺陷已被应用于磁场^[7-10]、温度^[11-12]和压力^[13-14]等物理量的量子精密测量中。

六方氮化硼由硼原子与氮原子以六角网状层面结合而成,拥有 6 eV 的宽带隙,这使它能够容纳各类辐射体^[15-17]。近年来,在六方氮化硼中发现了多种自旋缺陷,其中备受关注的是硼空位(V_B)缺陷。2018 年,Toledo 小组^[18]利用电子顺磁共振发现 V_B 缺陷具有自旋三重态的特点;2020 年,Gottscholl 小组^[19]探测到这种缺陷的光探测磁共振(optically detected magnetic resonance, ODMR)谱,并通过理论计算辨别出其为带负电荷的硼空位缺陷;2021 年,Tongcang Li 小组^[7]首次实现了 V_B 缺陷的 Rabi 振荡。

V_B 缺陷是六方氮化硼中的 1 个硼原子缺失形成空位,并在空位上捕获 1 个电子,与邻位 3 个等价的氮原子耦合形成的稳定结构。自然环境下六方氮化硼中的 V_B 缺陷数量较少,实验中可以通过中子辐照^[18]、飞秒激光写入^[20]、电子辐照^[21]等方法产生。除此之外,还有一种简单、方便的方法,即利用氮离子注入^[22-23]在六方氮化硼中产生较多的 V_B 缺陷。

1 实验装置和样品制备

实验室自建的光学共聚焦实验系统以及 V_B 缺陷原子结构示意图如图 1 所示。

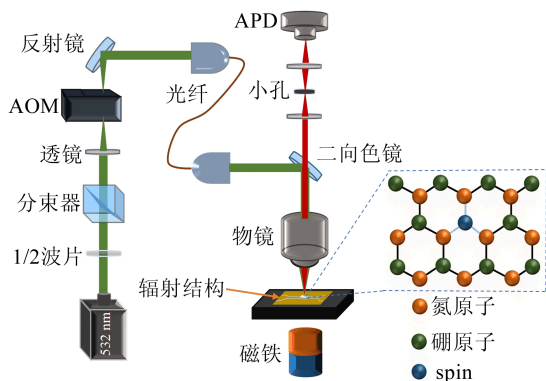


图 1 共聚焦实验系统以及 V_B 缺陷原子结构示意图

532 nm 激光用于 V_B 缺陷(其原子结构示意图见图 1 右下方)自旋态的初始化和读出,使用声光调制器实现激光的通断,激光通过显微物镜(Olympus, N. A. = 0.9)聚焦在六方氮化硼样品上, V_B 缺陷被激光激发辐射出的荧光按原路返回进入同一物镜后,透过二向色镜,再通过小孔进行空间滤波,穿过长波通滤波片和陷波滤波片过滤掉 532 nm 激光后进入单光子探测器(部分元件未画出)。微波信号由射频信号源(Rigol DSG3065B)产生,经功率放大器(Mini-Circuits ZHL-15W-422-S+)放大后,通过共面波导微波辐射结构辐射微波到样品上,用于操控 V_B 缺陷自旋态的翻转。控制激光和微波通断所需的脉冲信号由实验室自行设计制作的脉冲发生器产生,并由高速时间数字转换器采集得到。

实验所使用的六方氮化硼样品是从 HQ 石墨烯公司购买的高纯单晶片。本文首先使用胶带撕出多层六方氮化硼薄片,再用氮离子注入(能量为 10 kV, 剂量为 10^{15} 离子数/ cm^2 ; 氮气被电离成氮离子,经高压加速后撞击六方氮化硼表面,破坏晶格中的硼氮键,形成缺失硼原子的空位)后,得到用于实验的六方氮化硼样品;再将制备好的样品转移到共面波导微波辐射结构上。

2 V_B 的能级结构

V_B 缺陷能级结构简化示意图如图 2 所示。该能级结构主要由基态、激发态和亚稳态构成,其中基态是自旋三重态,分别为 $m_s = 0$ 和 $m_s = \pm 1$ (下文用 $|0\rangle$ 态和 $|\pm 1\rangle$ 态表示)。图 2 中: D 表示基态自旋态之间的零场劈裂值;蓝色曲线箭头表示施加在 $|0\rangle$ 态与 $|\pm 1\rangle$ 态之间的微波。

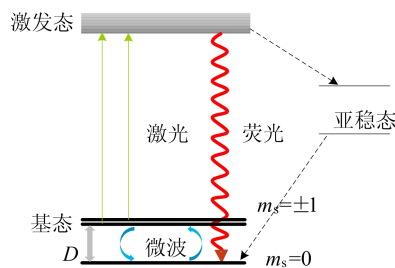


图 2 V_B 缺陷能级结构简化示意图

从图 2 可以看出, V_B 缺陷在 532 nm 激光(绿色箭头)的激发下,基态中的电子被激发到激发态但自旋态保持不变,其中 $|0\rangle$ 态的电子直接落回到基态的 $|0\rangle$ 态上并发出荧光(红色曲线箭头),

而 $|\pm 1\rangle$ 态的电子则以较大的概率通过系间跨越到达亚稳态后再落回到基态的 $|0\rangle$ 态上,如灰色虚线所示,此过程不发出荧光。这样通过激光的激发可以实现一个循环内基态中部分 $|\pm 1\rangle$ 态转化为 $|0\rangle$ 态,那么在长时间的激光激发下,经过不断循环便可以实现 V_B 缺陷自旋态初始化到基态中的 $|0\rangle$ 态。

3 实验过程与结果

V_B 缺陷的荧光稳定性和荧光饱和现象是本文首先探测的缺陷性质,实验结果如图 3 所示。

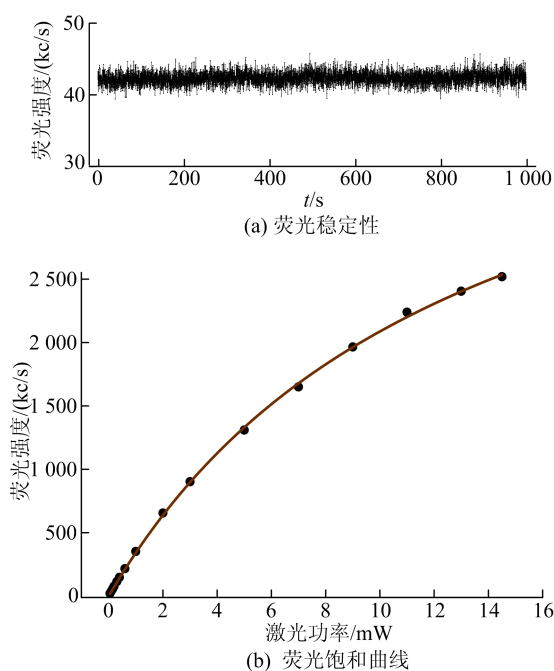


图 3 V_B 缺陷荧光性质

V_B 缺陷被 $100 \mu\text{W}$ 的 532 nm 激光连续激发下,在 1000 s 的时间内表现出稳定的荧光发射信号,没有任何荧光闪烁或漂白现象,如图 3a 所示,说明该缺陷具有良好的光学稳定性;当改变 532 nm 激光的功率时,观察到 V_B 缺陷的荧光呈现饱和趋势,如图 3b 所示。拟合荧光饱和曲线使用如下公式:

$$I(P) = \frac{I_{\text{sat}}}{1 + P_{\text{sat}}/P} \quad (1)$$

其中: I_{sat} 为饱和荧光强度; P_{sat} 为饱和激光功率。

拟合结果表明,饱和激光功率为 $13.19 \text{ mW} \pm 0.41 \text{ mW}$ 时,饱和荧光强度为 $2420.71 \text{ kc/s} \pm 0.43 \text{ kc/s}$,说明该缺陷具备超高的荧光亮度。

由上述 532 nm 激光激发 V_B 缺陷的循环过程可知, $|0\rangle$ 态和 $|\pm 1\rangle$ 态表现出明显的荧光差。

ODMR 实验通过微波实现 $|0\rangle$ 态与 $|\pm 1\rangle$ 态之间的翻转,并在此过程中连续监测荧光强度,从而读取自旋态信息。在连续光探测磁共振(continuous wave optically detected magnetic resonance, CW-ODMR)实验中,观察磁场对 V_B 缺陷电子自旋的影响,实验结果如图 4 所示。

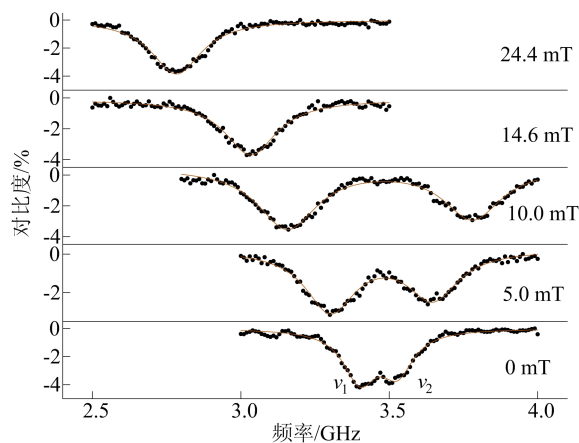


图 4 ODMR 共振峰随磁场的变化

实验脉冲序列为:激光持续开启,用于初始化自旋态和读出荧光强度;同时微波处于扫频状态,当微波的频率接近基态中 $|0\rangle$ 态与 $|\pm 1\rangle$ 态之间的跃迁频率(即共振频率)时,即可实现自旋态的翻转。2个明显下降的低峰 ν_1 、 ν_2 (即共振峰)代表 V_B 缺陷的自旋态为 $|\pm 1\rangle$ 态,两侧水平部分代表自旋态为 $|0\rangle$ 态,其中对比度 $= \frac{I_{|0\rangle} - I_{|\pm 1\rangle}}{I_{|0\rangle}} \times 100\%$, $I_{|0\rangle}$ 、 $I_{|\pm 1\rangle}$ 分别表示自旋态为 $|0\rangle$ 态和 $|\pm 1\rangle$ 态时所累积的荧光强度。在磁场 B (实验中使用永磁体施加垂直于六方氮化硼表面的静态磁场)为 0 mT 时,有 2 个共振峰 $\nu_1 = 3.41 \text{ GHz}$ 、 $\nu_2 = 3.53 \text{ GHz}$,通过这 2 个共振频率可以算出由自旋-自旋相互作用引起的纵向参数 $D/h = (\nu_2 + \nu_1)/2 = 3.47 \text{ GHz}$ 和局部电场或应变引起的横向分量 $E/h = (\nu_2 - \nu_1)/2 = 60 \text{ MHz}$ 。当磁场 B 变大时,从塞曼效应公式得出, $|\pm 1\rangle$ 态所属的 2 个共振峰 ν_1 减小、 ν_2 增大,在图 4 中表现为 2 个共振峰的间距随磁场增大而增大。塞曼效应公式为:

$$\nu_{1,2} = \nu_0 \pm \sqrt{E^2 + (g\mu_B B)^2} / h \quad (2)$$

其中: $\nu = D/h = 3.47 \text{ GHz}$; $E/h = 60 \text{ MHz}$; μ_B 为玻尔磁子; g 为朗德因子,通过共振频率与磁场的变化关系计算出朗德因子 $g \approx 2$ 。

在 ODMR 实验中微波功率是较关键的变量,

关系共振峰的对比度和线宽。因此本文研究在 CW-ODMR 实验下微波功率对共振峰的影响。

首先在无磁场时固定激光功率为 300 μ W,将微波功率从 10 mW 增加到 650 mW,实验结果如图 5 所示。图 5 中黑色数据点是实验中测得的共振峰对比度,可以看出,对比度从 0.7% 增大到 4.5%,并且呈饱和趋势,说明随着微波功率的增大辐射结构的辐射效率变高且开始饱和,黑色曲线是使用饱和公式拟合的结果。当无磁场时, V_B 缺陷的 2 个共振峰紧靠在一起,无法准确计算出共振峰线宽,需外加磁场让 2 个共振峰区分开;在磁场 $B=5$ mT 时测出的共振峰线宽如图 5 中橙色数据点所示,可以看出虽然增加了微波功率,但是共振峰的线宽基本在一条水平线上。

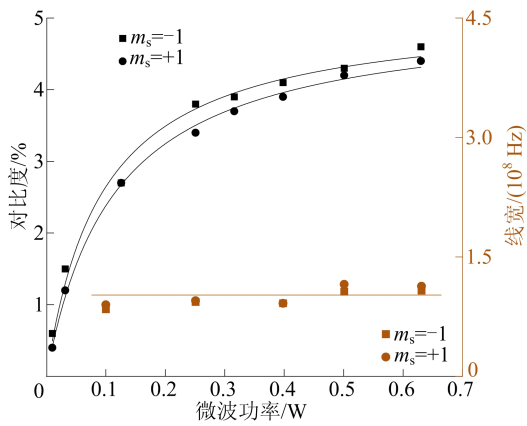


图 5 ODMR 对比度和线宽随微波功率的变化

从实验设备和 V_B 缺陷结构分析得出:① 实验中所使用的微波功率相对较低,若进一步增加微波功率,共振峰的线宽将有所增加;② V_B 缺陷是 1 个自由电子与相邻的 3 个 14 N 核耦合而成,且每一个氮核的核自旋 $I=1$,那么在电子自旋共振峰中会存在 $2 \times 3I + 1 = 7$ 个超精细结构跃迁频率峰。本文设想由于核自旋共振峰的间距较远,当增加微波功率时,这 7 个核自旋共振峰的线宽虽然会增大,但无法超过核自旋共振峰的间距,核自旋共振峰达不到简并状态。因此增加微波功率时,电子自旋共振峰的线宽没有明显增大。

为了验证上述猜想,本文将对 V_B 缺陷的核自旋光探测磁共振(ODNMR)作进一步的研究。考虑到 3 个氮核核自旋^[24]的情况下,基态的哈密顿量可以描述为:

$$H = D_{GS}S_z^2 + \gamma_e B_z S_z + \sum_{i=1}^3 (sA_i I_i - \gamma_n B_z I_{zi} + Q_i I_i) \quad (3)$$

其中:基态零场分裂参数 $D_{GS} = 3.47$ GHz; S, S_z 为电子自旋算符; I_i 为第 i 个核自旋算符; γ_e 为电子自旋旋磁比, $\gamma_e = 28$ MHz/mT; γ_n 为 14 N 核自旋旋磁比, $\gamma_n = 3.076$ kHz/mT; A_i, Q_i 分别为第 i 个 14 N 核的超精细相互作用参数和四极相互作用参数; z 轴方向垂直于六方氮化硼薄片。根据式(3),测量 ODNMR 谱时需设置精细的微波扫频步长(实验中设为 1 MHz)。

磁场 $B=30$ mT 时测得 $| -1 \rangle$ 态的 ODNMR 谱如图 6 所示。

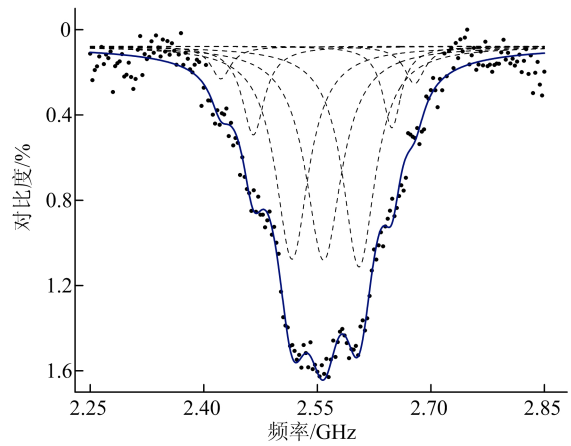


图 6 超精细结构

图 6 使用了七洛伦兹拟合模型,可以明显地分辨出这 7 个核自旋共振峰,并且拟合出 7 个峰的间距大约为 44.7 MHz。这验证了上文猜想,由于这 7 个核自旋共振峰的间距很大,若要明显地看到电子自旋共振峰展宽,则需要大功率微波。

为了相干地操纵 V_B 缺陷的自旋态,需要进一步进行 Rabi 振荡实验,结果如图 7 所示。

图 7a 所示为 V_B 缺陷的 Rabi 振荡实验序列:首先使用 1 000 ns 的 532 nm 激光初始化 V_B 缺陷的自旋态;再等待一段时间(这段时间远小于电子自旋退相干时间,可以忽略退相干带来的实验误差),让亚稳态的电子落回到基态;之后施加一段时间 τ 的微波(频率为 ν_1),用于操控 $|0\rangle$ 态与 $| -1 \rangle$ 态之间的翻转;最后一段 532 nm 激光的作用是读出当前的自旋态布居,并为下一个实验循环初始化。

在微波功率为 1 W、磁场 B 分别为 0、5 mT 时,测得的自旋态在 $|0\rangle$ 态与 $| -1 \rangle$ 态之间翻转的 Rabi 振荡曲线如图 7b 所示,可以看出 V_B 缺陷的 Rabi 振荡衰减速度非常快。图 7 中使用的拟合函数为:

$$y = A \exp(x/T_1) \cos(2\pi f_{\text{Rabi}} x + \theta) + B \exp(-x/T_2) + C \quad (4)$$

式(4)可以较好地拟合出 Rabi 振荡的前 2~3 个周期和 Rabi 频率。

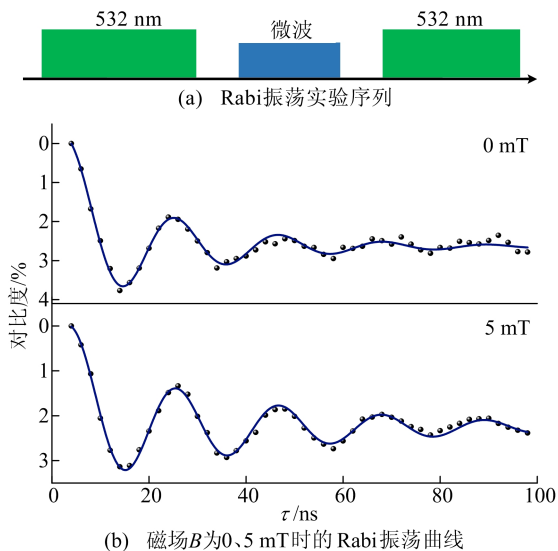


图 7 V_B^- 缺陷的 Rabi 振荡实验结果

观察图 6b 中 2 条曲线可以发现:在磁场 B 为 0 mT 时 Rabi 振荡衰减速度明显快于 5 mT 时,只有前 1.5 个周期表现出明显的振荡,随之便近乎呈现一条直线;而磁场 B 为 5 mT 时却有 3 个振荡周期。造成该实验结果的原因是在磁场 B 为 0 mT 时 $|\pm 1\rangle$ 态的 2 个共振峰紧靠在一起,从图 4 无磁场 ODMR 谱中可以看出 2 个共振峰有小部分的重合,因此在 Rabi 振荡实验中使用共振频率 ν_1 时也会引起 $|0\rangle$ 态和 $|+1\rangle$ 态的部分电子共振跃迁,而导致 $|0\rangle$ 态和 $|-1\rangle$ 态的 Rabi 振荡衰减速度变快,加磁场之后让 2 个共振峰不再重合便可以提高相干时间。不过 V_B^- 缺陷的相干时间^[25]确实很短,目前可以通过解耦序列(如 CPMG 序列)来提高相干时间。

4 结 论

本文通过氮离子注入的方式,在多层六方氮化硼样品产生了较多的 V_B^- 缺陷,并且在实验室自建的共聚焦系统中实现了 V_B^- 缺陷自旋态初始化、操控和读出 3 个过程;测量了 V_B^- 缺陷的荧光稳定性和荧光饱和现象,并研究了磁场对电子自旋的影响以及增大微波功率对 ODMR 共振峰对比度和线宽的影响;进一步测量了 V_B^- 缺陷的核自旋 ODMR 谱以及电子自旋的 Rabi 振荡曲线(有 3 个明显的振荡周期),并在有、无磁场下对比

了 Rabi 振荡的衰减速度,得出 V_B^- 缺陷的退相干时间非常短。

本文实现了对六方氮化硼中 V_B^- 缺陷的基本性质测量和相干操控,有利于研究者对 V_B^- 缺陷的深入研究,为其在量子信息科学中的进一步应用打好了基础。

[参 考 文 献]

- [1] MA H, GOVONI M, GALLI G. Quantum simulations of materials on near-term quantum computers[J]. npj Computational Materials, 2020, 6(1): 85-88.
- [2] CHEN B, HOU X, GE F, et al. Calibration-free vector magnetometry using nitrogen-vacancy center in diamond integrated with optical vortex beam[J]. Nano Letters, 2020, 20(11): 8267-8272.
- [3] JIANG Z, CAI H, CERNANSKY R, et al. Quantum sensing of radio-frequency signal with NV centers in SiC[J]. Science Advances, 2023, 9(20): eadg2080.
- [4] BABER S, MALEIN R N E, KHATRI P, et al. Excited state spectroscopy of boron vacancy defects in hexagonal boron nitride using time-resolved optically detected magnetic resonance[J]. Nano Letters, 2021, 22(1): 461-467.
- [5] MU Z, CAI H, CHEN D, et al. Excited-state optically detected magnetic resonance of spin defects in hexagonal boron nitride[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(21): 216402.
- [6] ZHOU F, JIANG Z, LIANG H, et al. DC magnetic field sensitivity optimization of spin defects in hexagonal boron nitride[J]. Nano Letters, 2023, 23(13): 6209-6215.
- [7] GAO X, JIANG B, LLACSAHUANGA A E, et al. High-contrast plasmonic-enhanced shallow spin defects in hexagonal boron nitride for quantum sensing[J]. Nano Letters, 2021, 21(18): 7708-7714.
- [8] HUANG M, ZHOU J, CHEN D, et al. Wide field imaging of van der Waals ferromagnet Fe_3GeTe_2 by spin defects in hexagonal boron nitride[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5369.
- [9] LIANG H, CHEN Y, YANG C, et al. High sensitivity spin defects in hBN created by high-energy He beam irradiation[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(1): 2201941.
- [10] RIZZATO R, SCHALK M, MOHR S, et al. Extending the coherence of spin defects in hBN enables advanced qubit control and quantum sensing[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5089.
- [11] GOTTSCHOLL A, DIEZ M, SOLTAMOV V, et al. Spin defects in hBN as promising temperature, pressure and magnetic field quantum sensors[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 4480.
- [12] LIU W, LI Z P, YANG Y Z, et al. Temperature-dependent energy-level shifts of spin defects in hexagonal boron nitride[J]. ACS Photonics, 2021, 8(7): 1889-1895.
- [13] LYU X, TAN Q, WU L, et al. Strain quantum sensing

- with spin defects in hexagonal boron nitride[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(16): 6553-6559.
- [14] YANG T, MENDELSON N, LI C, et al. Spin defects in hexagonal boron nitride for strain sensing on nanopillar arrays[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(13): 5239-5244.
- [15] EXARHOS A L, HOPPER D A, PATEL R N, et al. Magnetic-field-dependent quantum emission in hexagonal boron nitride at room temperature[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 222.
- [16] CHEJANOVSKY N, MUKHERJEE A, GENG J, et al. Single-spin resonance in a van der Waals embedded paramagnetic defect [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(8): 1079-1084.
- [17] CAMPHAUSEN R, MARINI L, TAWFIK S A, et al. Observation of near-infrared sub-Poissonian photon emission in hexagonal boron nitride at room temperature[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(7): 076103.
- [18] TOLEDO J R, DE JESUS D B, KIANINIA M, et al. Electron paramagnetic resonance signature of point defects in neutron-irradiated hexagonal boron nitride [J]. *Physical Review B*, 2018, 98(15): 155203.
- [19] GOTTSCHOLL A, KIANINIA M, SOLTAMOV V, et al. Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature[J]. *Nature Materials*, 2020, 19(5): 540-545.
- [20] GAO X, PANDEY S, KIANINIA M, et al. Femtosecond laser writing of spin defects in hexagonal boron nitride[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(4): 994-1000.
- [21] MURZAKHANOV F F, YAVKIN B V, MAMIN G V, et al. Creation of negatively charged boron vacancies in hexagonal boron nitride crystal by electron irradiation and mechanism of inhomogeneous broadening of boron vacancy-related spin resonance lines[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(6): 1373.
- [22] GUO N J, LIU W, LI Z P, et al. Generation of spin defects by ion implantation in hexagonal boron nitride[J]. *ACS omega*, 2022, 7(2): 1733-1739.
- [23] KIANINIA M, WHITE S, FRÖCH J E, et al. Generation of spin defects in hexagonal boron nitride[J]. *ACS photonics*, 2020, 7(8): 2147-2152.
- [24] IVÁDY V, BARCZA G, THIERING G, et al. Ab initio theory of the negatively charged boron vacancy qubit in hexagonal boron nitride[J]. *npj Computational Materials*, 2020, 6(1): 41.
- [25] HAYKAL A, TANOS R, MINOTTO N, et al. Decoherence of VB-spin defects in monoisotopic hexagonal boron nitride[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4347.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 241 页)

- [15] HE C, YANG G, ZOU G, et al. Dissymmetry enhancement in enantioselective synthesis of helical polydiacetylene by application of superchiral light[J]. *Nat Commun*, 2018, 9: 5117-5124.
- [16] IKAI T, SHIMIZU S, SHINOHARA K, et al. Chiral amplification in π -conjugated helical polymers with circularly polarized luminescence[J]. *Macromolecules*, 2018, 51(6): 2328-2334.
- [17] NISHIKAWA T, NAGATA Y, SUGINOME M. Poly(quinoline-2,3-diyl) as a multifunctional chiral scaffold for circularly polarized luminescent materials; color tuning, energy transfer, and switching of the CPL handedness[J]. *ACS Macro Letters*, 2017, 6: 431-435.
- [18] LIU W B, XU X H, WU Z Q, et al. Bottlebrush polymers carrying side chains on every backbone atom: controlled synthesis, polymerization-induced emission, and circularly polarized luminescence[J]. *Macromolecules*, 2021, 54(7): 3158-3168.
- [19] KAJITANI T, OKOSHI K, YASHIMA E, et al. Helix-sense controlled polymerization of a single phenyl isocyanide enantiomer leading to diastereomeric helical polyisocyanides with opposite helix-sense and cholesteric liquid crystals with opposite twist-sense[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(3): 708-709.
- [20] LIU N, ZHOU L, WU Z Q, et al. Alkyne-palladium(II)-catalyzed living polymerization of isocyanides; an exploration of diverse structures and functions[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2021, 54(20): 3953-3967.
- [21] LI Y X, XU L, KANG S M, et al. Helicity- and molecular-weight-driven self-sorting and assembly of helical polymers towards two-dimensional smectic architectures and selectively adhesive gels[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(13): 7174-7179.
- [22] ZHOU L, XU X H, WU Z Q, et al. Selective synthesis of single-handed helical polymers from achiral monomer and a mechanism study on helix-sense-selective polymerization [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(2): 806-812.

(责任编辑 闫杏丽)