

专题: 半导体物理与器件

金刚石氮空位色心: 从基本原理到量子探测*

李跃辉¹⁾ 程少博^{1)2)†} 单崇新¹⁾²⁾

1) (河南省科学院量子材料与物理研究所, 郑州 450046)

2) (郑州大学物理学院, 集成电路设计与应用研究院, 教育部重点实验室, 河南省金刚石光电材料与器件重点实验室, 郑州 450052)

(2025年11月10日收到; 2025年12月9日收到修改稿)

金刚石氮空位色心凭借室温毫秒级自旋相干、原子级空间尺寸、非侵入无破坏性、化学结构稳定、生物无毒与多物理场耦合强度可调等特性, 迅速成长为横跨凝聚态物理、新兴量子技术、纳米科技和生命科学的最具活力的多功能固态量子平台. 其电子自旋可被激光高效极化, 也能通过微波共振实现量子态操控, 已实现了磁场、电场、温度、应力、自旋等物理场的高灵敏度测量, 部分实验已实现单核自旋或单电子电荷的识别. 本综述首先对金刚石氮空位(NV)色心的基本性质进行简明的概述, 阐明自旋轨道耦合、超精细耦合等对系统能级的影响, 然后系统梳理了NV色心的制造方法, 详细描述了如何利用NV色心进行纳米尺度的传感测量和应用.

关键词: 氮空位色心, 量子传感, 器件制备, 应用**DOI:** [10.7498/aps.75.20251531](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251531)**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251531](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251531)

1 引言

2025年的诺贝尔物理学奖授予 John Clarke, Michel Devoret 与 John Martinis, 他们通过约瑟夫森结首次观测到宏观自由度的量子化能级, 奠定了超导量子比特的技术与概念基础, 使“量子计算芯片”从梦想走向工程现实. 超导比特纳秒级门速度、与微纳工艺兼容的特性, 天生适合大规模快速量子处理器; 然而其 10 mK 工作温度与百微秒相干时间, 限制了其应用范围. 正好, 金刚石氮空位(NV)色心凭借其室温毫秒级自旋相干时间、原子级空间分辨和非侵入特性, 弥补了超导比特“快而冷”的劣势. “超导-NV 混合”的量子计算路线综合了两者的优势: 前者负责高速量子逻辑运算, 后者负责长时间量子存储^[1].

相比于其他测量手段, NV 色心在探测电子、光子、声子等(准)粒子的动力学行为及元激发特

性方面具有独特的优势. 经典的电学输运测量、非弹性中子散射、拉曼光谱、角分辨光电子能谱(ARPES)等技术往往给出的是空间平均的结果, 无法对微观尺度的无序结构、畴的动力学演化、缺陷-(准)粒子相互作用进行空间分辨的研究^[2]. 已有的几种纳米级探针也都有各自的适用范围, 扫描隧道显微镜可在原子尺度探测不同能级的电子态密度分布, 但要求样品导电且表面洁净^[3-5]; 最新的 nano-ARPES 可达~100 nm 空间分辨, 可测动量分辨能量色散, 但需要大型同步辐射光源, 而且对荷电效应非常敏感^[6,7]; 扫描透射电子显微镜可达十几 pm 空间分辨率, 原子尺度测量晶格畸变, 但高能电子可能损伤样品, 对电子结构、磁场的灵敏度比较低^[8,9]; 磁力显微镜、扫描超导量子干涉仪等探针也有各自的局限^[3].

近年来, 基于金刚石中 NV 色心的电子自旋开发的磁力测量技术, 在空间分辨、能量分辨、动量分辨、工作温区以及可同时测量静态与动态物性方

* 国家自然科学基金(批准号: 52572052, 12504007)和河南省中原科技创新领军人才项目(批准号: 254000510060)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chengshaobo@zsu.edu.cn

面,对上述技术形成了有力的补充.1997年,Gruber等^[10]探测到了NV色心的首个光探测磁共振谱(ODMR);2008年,NV色心探测器被首次提出并实验验证^[11–13].从此以后,基于NV色心的量子传感器便展现出其他传感技术无法企及的综合性能,得到了研究人员的青睐,获得了迅速的发展^[14–19].NV色心可实现原子级空间分辨率^[20],可探测单电子和单原子核自旋^[21,22],工作温度从1K的极低温到室温^[23],磁场探测范围从零到数特斯拉^[24],而且几乎不会对被测体系造成扰动.NV色心在温度测量、质子自旋耦合、量子计算、大气环境监测等领域获得了广泛的应用^[25–32].NV色心的另一大优势是对生物无毒,在病毒粒子检测、pH值检测、细胞内温度测量、神经电位测量等生命科学领域具有广阔的应用前景^[27].

本综述在系统梳理金刚石NV色心基本原理与制备技术的基础上,特别侧重阐述其在多物理量集成传感与交叉应用场景中的最新进展,旨在为读者提供一个从基础物理到系统集成的连贯视角,尤其适合关注NV色心实用化与跨学科应用的研究人员参考.本文第2节简要回顾了NV色心依赖的晶体学结构和电子结构及退相干机制;第3节介绍了NV色心的可控制备和量子传感器的制造方式;第4节重点介绍了NV色心在凝聚态物理中磁场、电场、温度、应力等方面的重要应用,并简单介绍了其在生物学领域的应用前景;最后,展望了NV色心未来的改进和拓展方向.

2 NV色心的物理基础

2.1 晶体学与电子结构

金刚石最常见的是面心立方结构,每个碳原子与4个近邻碳原子通过 sp^3 杂化轨道形成共价键,构成四面体结构,这一高度对称的强共价键网络赋予金刚石极高的硬度、低压缩率和化学稳定性.最近,Chen等^[33,34]在极端条件下合成了六方结构的金刚石,具有独特的性质,本文不做过多讨论,感兴趣的可以参考相关工作.纯净的金刚石是无色透明的,掺入一定量的杂质会呈现不同的颜色.天然金刚石按杂质类型与含量可分为4类:Ia型,含氮杂质浓度最高,可达3000 ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$),氮以聚合体(N_2 、 N_3 、片晶等)形式存在;Ib型,氮杂质含量在10–500 ppm,氮以孤立取代碳的单原子形

式存在,工业高温高压法合成的金刚石多属此型;IIa型,氮含量 $< 1 \text{ ppm}$,杂质极低,光学纯度极高,通常无色透明;IIb型,氮含量极小,含少量硼(约0.1–10 ppm),硼作为受主使其具有p型半导体特性.

金刚石晶格中的一个碳原子被氮原子取代,同时邻位存在一个碳空位,氮原子和邻位碳空位形成了一个系统,即氮空位色心,简称NV色心,结构如图1(a)所示,氮空位连线的[111]为主轴方向.NV色心通常具有两种价态:电中性 NV^0 和电负性 NV^- ,两者的荧光光谱如图1(b)所示^[35]. NV^0 含有5个电子,其中2个来源于氮原子,3个来源于碳空位的悬挂键. NV^0 捕获一个施主杂质提供的电子,形成 NV^- .NV自旋为 $S = 1$,存在未配对电子,电子间的自旋-自旋耦合使其天然存在零场劈裂,荧光对比度远高于 NV^0 ,适合量子计算和传感器,本文将重点介绍NV⁻系统,后文没有特殊说明,NV均指NV⁻系统.NV的能级结构如图2(a)所示,基态能级 3A_2 和激发态能级 3E 相差1.945 eV,

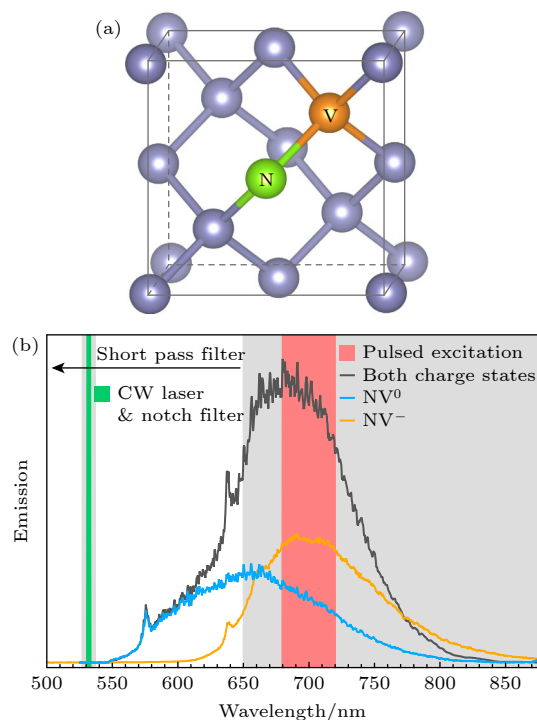


图1 金刚石NV色心的结构和光谱图 (a)金刚石中的NV色心结构;(b)NV⁰和NV⁻的光谱,零声子线分别位于575 nm和637 nm^[35]

Fig. 1. Structure and optical spectrum of diamond NV center: (a) Schematic of NV center; (b) optical spectrum of neutral center NV^0 and negatively charged center NV^- , the zero-phonon line of NV^0 (NV^-) emission is located at 575 nm (637 nm) ^[35].

对应光子波长 637 nm, 实验中经常用 532 nm 波长激光进行非共振激发. 基态和激发态都是自旋为 1 的三重态, 零磁场下, 自旋-自旋耦合导致能级劈裂, $|m_s = \pm 1\rangle$ 简并, 与 $|m_s = 0\rangle$ 态的能级差为 2.87 GHz. 处于激发态的 NV 色心可以通过两种途径回到基态: 一种是辐射跃迁, 自旋态 $|m_s = 0\rangle$ 或 $|m_s = \pm 1\rangle$ 的激发态会跃迁回对应的 $|m_s = 0\rangle$ 或 $|m_s = \pm 1\rangle$ 的基态, 同时向外辐射光子; 另一种是非辐射跃迁, $|m_s = \pm 1\rangle$ 的激发态先弛豫到亚稳态 1A_1 和 1E , 然后回到 $|m_s = 0\rangle$ 的基态, 这一过程不辐射光子, 通常称为系间穿越 (intersystem crossing, ISC). 因此自旋为 1 的激发态比自旋为 0 的激发态发光更弱, 可以根据荧光强度来区分 NV 系统的自旋态. 图 2(b) 描述了自旋 $|m_s = +1\rangle$ 的 6 个电子的填充示意图, 图中箭头代表了 NV 体系从基态跃迁到激发态时, 对应内部电子态的跃迁 [36].

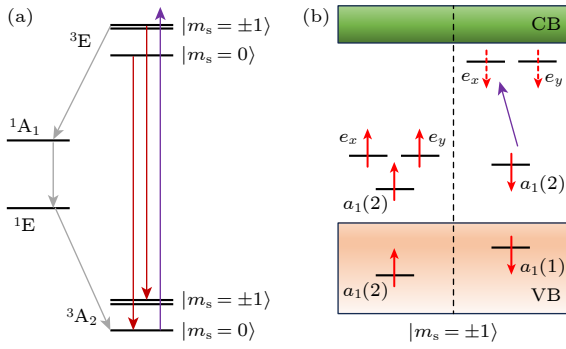


图 2 金刚石 NV 色心能级结构 (a) NV 色心的基态、激发态和亚稳态及跃迁路径图; (b) NV 色心能级结构和 $|m_s = +1\rangle$ 时的电子态, 红色箭头表示单电子自旋态, 紫色箭头表示体系由基态跃迁到激发态

Fig. 2. Diagram of energy level structure of diamond NV center: (a) Ground state, excited state, metastable state and transition path of NV center; (b) energy level position of NV center in the band gap of diamond and the electronic states at $|m_s = +1\rangle$, the occupation states and spin states of electrons are marked by red arrows, the purple arrows represent the transition from ground state to excited state.

2.2 自旋哈密顿量与电子结构

金刚石 NV 基态的哈密顿量为 [37]

$$H = H_0 + H_B + H_E + H_I + H_S, \quad (1)$$

其中, $H_0 = DS_z^2$ 代表零场劈裂项, 来源于未配对电子的自旋-自旋相互作用, $D = 2.87$ GHz 是零场分裂常数, $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ 为无量纲电子自旋算符的 3 个分量; $H_B = \gamma \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ 代表自旋在磁场下的塞

曼分裂, \mathbf{B} 代表磁场强度, $\gamma = 28.03$ GHz/T 为旋磁比. 在磁场下, $|m_s = \pm 1\rangle$ 会分裂成 $|m_s = +1\rangle$ 和 $|m_s = -1\rangle$ 两个自旋态, ODMR 谱中表现为 2 个峰位, 根据峰位间距可以探测 NV 色心所受磁场相关信息. $H_E = d_{//} E_z S_z^2 + d_{\perp} E_x (S_y^2 - S_x^2) + d_{\perp} E_y (S_x S_y + S_y S_x)$ 代表电子自旋与电场的相互作用, $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$ 为电场的 3 个分量, $d_{//} = (0.35 \pm 0.002)$ MHz/(MV·cm⁻¹) 和 $d_{\perp} = (17.5 \pm 3)$ MHz/(MV·cm⁻¹) 分别代表平行轴线 (NV 轴) 和垂直轴线的电偶极矩 [38,39]. $H_S = M_z S_z^2 + M_x (S_y^2 - S_x^2) + M_y (S_x S_y + S_y S_x)$ 代表电子自旋与晶体应力的相互作用, $\mathbf{M} = (M_x, M_y, M_z)$ 代表自旋应力耦合常数. H_I 代表电子自旋与原子核自旋的相互作用, 表达式为

$$H_I = A_{//} S_z I_z + A_{\perp} (S_x I_x + S_y I_y) + P [I_z^2 - I(I+1)/3] - g_I \mu_N / h \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{I} = (I_x, I_y, I_z)$ 代表原子核自旋 (对于 ¹⁴N, $I = 1$; 对于 ¹⁵N, $I = 1/2$), $A_{//}$ 和 A_{\perp} 代表轴向和横向的超精细耦合常数, P 代表核的电四极矩, g_I 代表核的 g 因子, μ_N 是核磁子, h 为普朗克常数. 值得一提的是, 对于 ¹⁵N 核, 电四极矩耦合项为零.

2.3 自旋相干与退相干通道

在金刚石晶格中, NV 的退相干是指量子态从“可逆叠加”走向“经典混合”的过程. NV 的电子基态为自旋三重态, 借助微波操控可形成三重态的任意量子叠加; 然而, 环境的不均匀波动与叠加态耦合导致相位随时间随机漂移, 最终失去可相干性, 这一过程被统称为退相干 [40]. NV 色心退相干会降低测量精度, 并可能缩短可测量的寿命, 因为退相干过程会破坏 NV 色心中电子自旋的量子相干性, 导致量子比特的信息丢失. 退相干过程可由 3 个弛豫时间常数表征: T_2^* , T_2 和 T_1 . T_2^* 和 T_2 称为横向弛豫时间, 描述了自旋角动量的横向分量衰减到零的过程 [41]. 其中 T_2^* 代表自旋系统中静态或准静态 (缓慢变化) 的不均匀性引起的退相干, 例如其他杂质引入的局域偶极场, Ramsey 回波序列经常被用来测量 T_2^* . T_2 描述了非准静态部分即局域磁场的动态涨落引起的退相干, 也被称作自旋-自旋弛豫时间, 超过 T_2^* 几个数量级 [42], 可由 Hahn 回波序列测量. Ramsey 序列和 Hahn 序列的时序图如图 3(a) 所示, 两者的差别在于 Hahn 序列在时序

中间多了一个 π 相位时序. 图 3(b), (c) 分别展示了 Ramsey 序列和 Hahn 序列的自旋态在 Bloch 球上的演化示意图. 对于 Hahn 序列, π 相位使 NV 的自旋态镜像翻转, 这样序列后半段 $\tau/2$ 静态场累加的相位和前半段 $\tau/2$ 累加的相位抵消, 重新恢复相干性 [37]. Hahn 回波序列对直流信号不敏感, 经常用于测量交流信号, Ramsey 序列则经常用于测量直流信号. T_1 称为纵向弛豫时间, 描述了自旋系统与晶格相互作用引起的退相干, 是体系从非平衡布居回到热平衡所需的指数衰减常数, 决定了量子态在“能量层面”活多久. 由于金刚石德拜温度高达 1860 K, 室温下声子激发很弱, T_1 长达 1.2 ms [43].

多种机制可以导致 NV 的退相干. 首先, ^{13}C 核自旋的热涨落在其中占据非常大作用 [44]. 天然金刚石中 ^{13}C 核自旋丰度约为 1.1%, 每个 NV 周围平均有数十个 ^{13}C , 它们在外加磁场下以 kHz—MHz 的拉莫频率缓慢进动, 通过超精细耦合作用在 NV 电子自旋上叠加一个随时间缓慢变化的局域磁场. 另一个重要来源是磁性杂质与电子自旋噪声构成的磁偶极涨落. 高温高压合成金刚石或离子

注入过程中会引入 Ni, Cr 等顺磁中心, 它们的电子自旋翻转时间从 μs 到 ms 不等, 导致 NV 感受到的磁场既有“静态”分量 (引起 T_2^* 失相), 也有“动态”分量 (引起 T_2 衰减). 第三, 电荷态涨落与电场噪声在纳米尺度对相干性影响尤为显著. NV 和 NV^0 之间的电荷跃迁由费米能级漂移决定, 表面终端、缺陷态或金属电极都会在 kHz—MHz 频段随机调制 NV 色心的电荷态. 第四, 室温下电声耦合也是不可忽视的退相干源, 声子不仅通过拉曼过程使激发态寿命缩短, 还通过动态 Jahn-Teller 效应调制基态能级 [45]. 另外, 表面缺陷与粗糙度对浅层 NV 的相干性尤为致命, 表面悬挂键、石墨化层以及金属缺陷会产生未配对电子自旋, 形成强烈的磁近场噪声 [46], 同时, 表面电荷陷阱也会带来低频电场涨落 [47].

NV 退相干是多源噪声的叠加, 通过同位素纯化、低温、表面钝化、动态解耦和实时反馈等技术, 科学家已将退相干时间从天然样品的百纳秒量级提升到秒量级, 为纳特斯拉级别的磁力计、室温量子寄存器和量子网络节点奠定了坚实基础.

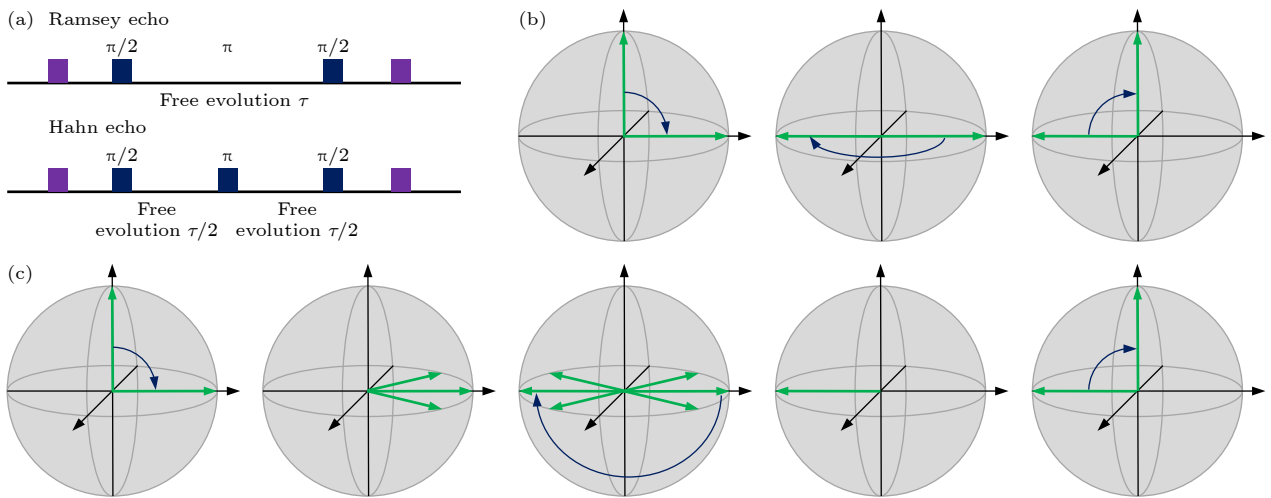


图 3 Ramsey 和 Hahn 序列示意图 (a) Ramsey 和 Hahn 序列的时序图; (b) Ramsey 序列的自旋态在布洛赫球上的演化示意图, 自旋初始化为 $|m_s = +1\rangle$ 态后, 一个 $\pi/2$ 脉冲将态矢量旋转 $\pi/2$, 制备出 $|m_s = +1\rangle$ 与 $|m_s = -1\rangle$ 的叠加态, 接着布洛赫矢量在球面上自由进动时间 τ , 累积与静磁场成正比的相位 Φ , 第 2 个 $\pi/2$ 脉冲把累积的相位映射为 $|m_s = +1\rangle$ 与 $|m_s = -1\rangle$ 的布居数差, 最后, 通过投影式自旋态测量读取布居数差, 即可确定自旋所感受到的静磁场强度; (c) Hahn 序列的自旋态在 Bloch 球上的演化示意图, 在 $\tau/2$ 时刻施加一个 π 脉冲后, 自旋于 $\tau/2$ 时间后重新聚相, 消除了因静态磁场不均匀导致的自旋失相

Fig. 3. Schematic of Ramsey and Hahn sequence: (a) Pulse sequences for Ramsey and Hahn magnetometry protocol; (b) Bloch sphere depiction of Ramsey sequence, after initializing the spin into the $|m_s = +1\rangle$ state, a $\pi/2$ pulse rotates the state vector by $\pi/2$, creating a superposition of $|m_s = +1\rangle$ and $|m_s = -1\rangle$, the Bloch vector then processes freely on the sphere for a time τ , accumulating a phase Φ proportional to the static magnetic field, a second $\pi/2$ pulse maps this accumulated phase onto a population difference between $|m_s = +1\rangle$ and $|m_s = -1\rangle$, finally, a projective spin-state measurement reads out this population difference, yielding the strength of the static magnetic field experienced by the spin; (c) Bloch sphere depiction of Hahn sequence: spin dephasing due to static field inhomogeneities followed by application of a π pulse at time $\tau/2$ and then spin rephasing at time τ .

3 NV 色心器件制备

当前主流的金金刚石合成工艺分为高压高温 (high pressure high temperature, HPHT) 和微波等离子体化学气相沉积 (microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD) 两种. HPHT 以石墨或金刚石粉为原料, 在 5—6 GPa, 1300—1600 °C 环境下, 借助金属触媒粉 (由 Fe, Ni, Mn, Cr 等金属组成) 催化, 数小时内即可长出毫米级单晶. 如图 4 所示, 金属触媒显著降低了 HPHT 法所需的温度和压力 [48]. HPHT 合成法成本低、速度快, 由于在大气环境下合成, 导致 HPHT 金刚石中含有大量的 N 杂质, 经退火与辐照后可批量生成 NV 色心. MPCVD 以含碳气体和氢气为气源, 在 900—1200 °C、数十 Torr (1 Torr = 1.33×10^2 Pa) 压力下, 利用微波激发反应气体生成等离子体, 让碳原子逐层沉积在单晶衬底上, 生长速度虽仅 $\mu\text{m}/\text{h}$, 却可精准控制杂质 (氮、硼) 浓度至 ppb 级 ($1 \text{ ppb} = 10^{-9}$), 获得光学级无色或粉红色大单晶. 通过原位掺杂或后处理, 可定向引入 NV、硅空位 (SiV)、锗空位 (GeV) 等量子缺陷. 近年来, 异质外延、电子束辐照生长与三维打印微晶格技术 [49–51] 进一步拓宽了形状、尺寸与掺杂维度的自由度. 人们已经开发了多种技术路线在金刚石晶体内生 NV 色心, 这些路线各有优劣.

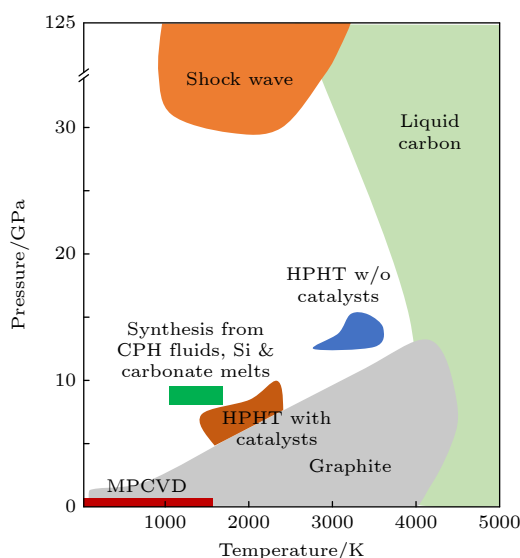


图 4 单质碳的相图 [48]

Fig. 4. Phase diagram of element carbon [48].

3.1 离子注入

离子注入技术是半导体工业中最常用的掺杂技术, 可以精确控制离子的空间分布和注入剂量. 离子注入工艺和光刻技术相结合, 在纳米级工艺制造领域应用广泛. 离子注入工艺的核心思路是“先掺氮、再空位、后退火”. 如图 5(a), (b) 所示, 首先, 利用掩模版在金刚石表面制造所需图案; 然后高能氮离子 (keV—MeV) 按照设定好的剂量轰击, 使氮原子注入晶格 [57]; 接着, 利用其他杂质离子或高能质子轰击晶格, 将 C 原子击出形成空位 [58]; 最后, 在惰的气氛中进行退火, 空位迁移并被氮原子捕获, 形成 NV 色心阵列, 同时退火修复离子注入过程中造成的晶格损伤 [59]. 图 5(c), (d) 展示了离子注入法制造的 NV 色心阵列和光谱图 [52].

虽然离子注入工艺在硅基半导体行业非常成熟, 但是对金刚石又有很大不同. 高能离子注入可能会导致表面石墨化 [60], 而且由于 NV 空位形成率只有 0.1%—2% [57,61], 金刚石键长很短, 高浓度 N 原子注入会产生大量的应变 [62], 同时金刚石键能很大, 需要高温退火才会驱使原子和空位迁移 [63]. 上述问题的解决需要寻找合适的注入和退火工艺参数 [64]. Wang 等 [65] 利用 60 keV 的 $^{14}\text{N}_2^+$ 注入工艺制造了 2 μm 宽的 NV 色心阵列, NV 色心深度控制在 50 nm, 自旋相干时间提升到 108 μs . Schröder 等 [66] 通过聚焦离子束注入法在金刚石纳米结构中直接、无掩膜地创建了硅空位阵列, 定位精度小于 50 nm, 横向扩展小于 32 nm. Chakraborty 等 [67] 通过优化原位超高真空注入和热处理工艺, 避免了表面电荷效应, 也没有观察到表面石墨化.

3.2 CVD 生长原位掺杂

与离子注入工艺的“后掺杂”思路不同, CVD 法在单晶金刚石外延时即通入含氮气体, 把氮掺杂、空位引入和热退火同步耦合在热力学生长窗口内, 因此既能获得极低的本底杂质, 又能精确控制 NV 的纵向深度分布. 最常用的 N 源有 N_2 , NH_3 或三甲胺; 生长过程中氢等离子体对表面碳原子的化学刻蚀会产生空位; 生长完成后的退火可以让空位扩散并被 N 原子捕获形成 NV. 原位掺杂的关键是衬底温度、等离子体密度、氮分压 3 个变量的有效耦合, 衬底温度一般在 700—1100 °C. 原位掺杂技术可以方便地通过调节 N 源浓度调节 NV 色心的

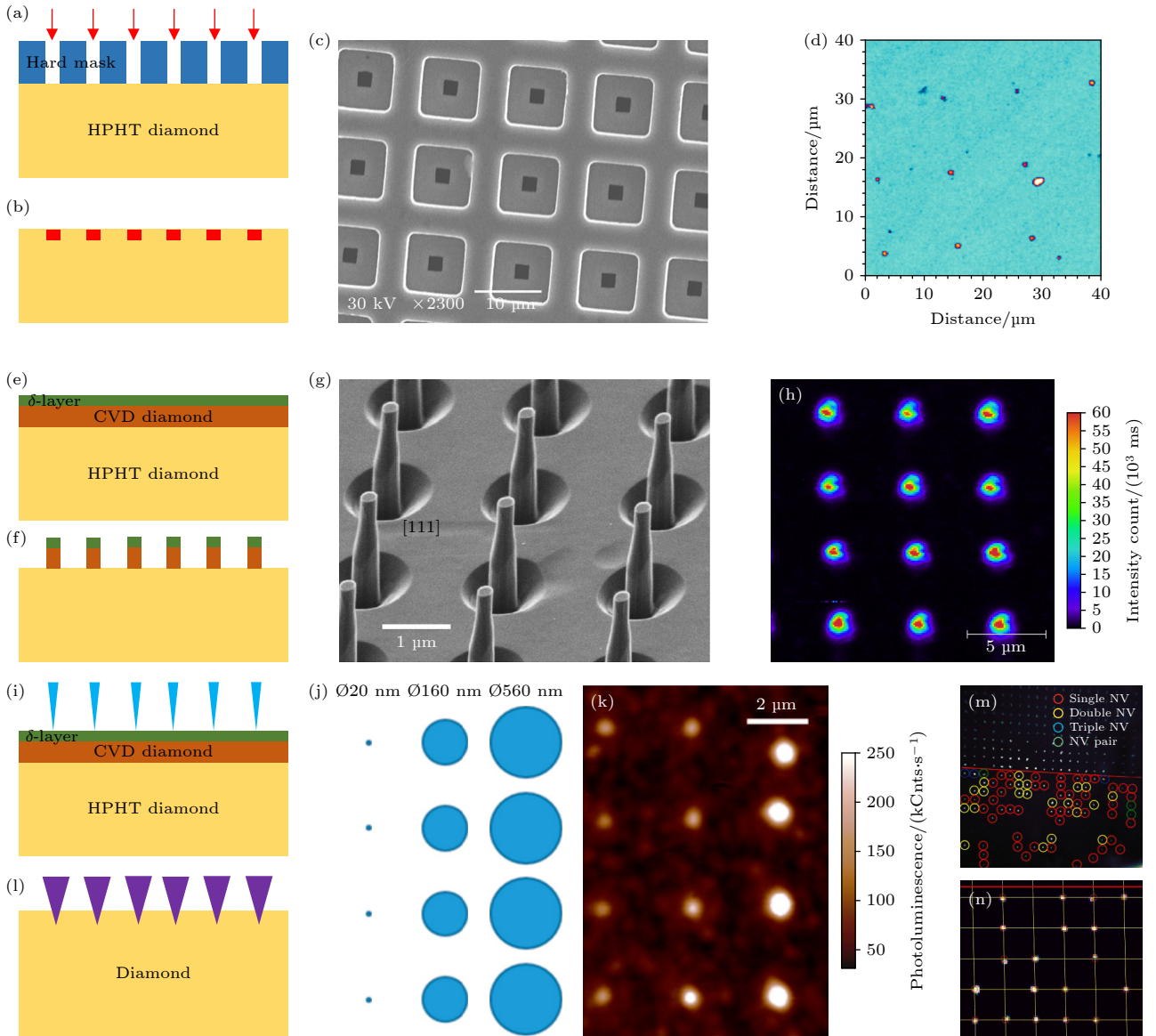


图 5 金刚石 NV 色心的几种制造方法示意图 (a), (b) 离子注入法利用硬掩模版在金刚石表面形成 NV 色心阵列示意图; (c) 实验得到的 NV 阵列扫描图片; (d) NV 阵列光谱图^[52]; (e) CVD 法生长 δ 氮掺杂层; (f) 微纳加工得到的 NV 阵列柱; (g) 实验中制造的纳米柱阵列扫描图片; (h) NV 纳米柱阵列光谱图^[53,54]; (i) 电子束辐照法制造 NV 色心示意图; (j), (k) 不同光斑大小示意图和相应的光谱^[55]; (l) 激光辐照法制造 NV 色心示意图; (m), (n) 激光法得到的 NV 阵列光谱图^[56]

Fig. 5. Fabrication processes of diamond NV arrays: (a), (b) Schematic diagram of forming an NV center array on the diamond surface via ion implantation using a hard mask; (c) experimentally obtained scanning image of the NV array; (d) spectrum of the NV array^[52]; (e) growth of a δ -nitrogen-doped layer by CVD method; (f) NV array pillars obtained through micro-nano fabrication; (g) experimentally fabricated scanning image of nanopillar array; (h) spectrum of the NV nanopillar array^[53,54]; (i) schematic diagram of NV center fabrication via electron beam irradiation; (j), (k) schematic diagrams of different spot sizes and their corresponding spectra^[55]; (l) schematic diagram of NV center fabrication via laser irradiation; (m), (n) spectra of the NV array obtained by laser method^[56].

浓度, 从单个孤立 NV 色心到几十 ppb 浓度^[68]. NV 色心的深度可以通过 δ -掺杂技术来精确控制: 在生长过程中打开/关闭 N 源、改变衬底温度, 或者将衬底移除/移入等离子体^[69,70].

由于 N_2 键能很大 (9.8 eV), 需要很高的等离子体密度才能有效电离^[71], 所以 CVD 掺杂同样面

临 N 原子激活能高, 激活率低的问题, 百分之几的 N_2 通常只能引入百 ppb 级别的 N 掺杂浓度^[72]. CVD 法的另一个问题是在平面上控制 NV 色心的位置具有很大的挑战性. 针对这一问题, 有自上而下和自下而上两种解决办法: 自上而下即是先外延生成含有 NV 色心的金刚石薄膜, 然后利用光刻技

术刻蚀掉一部分金刚石,留下含有 NV 色心的区域^[53],如图 5(e)–(g) 所示;自下而上则是先在金刚石衬底上通过光刻技术刻蚀出孔洞阵列,然后在孔洞处外延 N 掺杂的金刚石,但会面临不同晶面金刚石生长速率不同的问题^[73].图 5(h) 展示了 CVD 法制造 NV 色心纳米柱阵列的光谱图^[53,54].

3.3 电子束辐照

高能电子束在穿过金刚石晶格时,通过库仑散射将能量传递给碳原子,产生初级“击出”空位,碳原子位移能约 30 eV,对应电子束的阈值电压为 145 keV^[55].一束能量为 2 MeV 的电子束在表面 0.5 mm 的距离内的空位产生率为 $2.15/(e\cdot\text{cm})$ ^[74].辐照完成后,样品经过高温退火,空位扩散被氮原子捕获形成 NV 色心,俘获率可达 25%^[75].表面经过氧等离子处理或者硫酸/硝酸清洗可进一步去除表面石墨层,稳定 NV 电荷态^[76].如图 5(i) 所示,与离子束相比,电子束经磁透镜聚焦束斑更小,空间分辨率更高, NV 色心横向定位精度可达 10 nm^[55].而且,电子束辐照引入的晶格损伤更均匀,应力梯度小,有助于维持高相干度.图 5(j)–(k) 展示了利用电子束辐照法制备得不同束斑大小的 NV 色心阵列示意图和发光光谱图^[55].

高能电子束辐照除了碰撞带来的损伤,还有 γ 射线引起的辐射损伤.碰撞损伤的深度在 mm 量级,辐射损伤则可以穿透整个金刚石衬底^[77].Zaitsev 等^[77]发现 1100 °C 退火可极大提升 NV 色心的形成比例,但稳定性不如生长过程中形成的 NV 色心,1500 °C 以上时 NV 色心和辐射缺陷有严重相互作用降低相干性.Capelli 等^[78]在电子束辐照时同步进行原位高温退火工艺,可使间隙 N 转化为 NV 色心的效率提升 117%.

3.4 激光直写

激光直写法本质上也是利用高能电子束形成空位,不过高能电子束是通过飞秒激光在空气中的

光丝效应 (filament effect) 形成的.在飞秒激光的光丝区域,空气中的氧气、氮气等气体分子被强电磁场和高能电子束电离形成高密度等离子体,高密度等离子体轰击金刚石晶格形成空位^[79,80].经退火,空位迁移形成 NV 色心.借助空间调制技术,激光直写的空间分辨率能够达到 33 nm,而且可以同时制备单 NV 色心和光波导,有效集成波导的增强作用和 NV 色心的长距离量子纠缠特性^[81].目前,飞秒激光照射制备的单个 NV 色心相干时间可达 100 μs 以上,与离子电子辐照制备的相干时间相当,因此该方法可以成为制备单光子源的新途径,应用于量子技术^[56].图 5(l) 展示了激光光斑在金刚石上移动形成 NV 阵列的示意图,图 5(m), (n) 为激光法制造 NV 色心阵列的发光光谱图^[56].

表 1 对比了 4 种主流金刚石 NV 色心制造工艺的关键性能参数,主要包括相干时间和磁场灵敏度.离子注入法在成本和灵活性上有优势,但通常以牺牲相干性能为代价.CVD 生长在实现长相干时间和高灵敏度方面综合表现最优,适用于高性能器件.电子束辐照和激光直写在空间分辨率和磁场灵敏度上能取得比较好的折中.

4 NV 量子传感应用

如今,在量子力学的推动下,大多数现代器件逐渐逼近其性能极限,这一现状推动了量子技术的研究与发展.金刚石 NV 色心因其卓越的物理性质,在复杂环境中展现出非凡的鲁棒性,已成为一种革命性的量子传感器.其核心优势在于能够将微观的磁、电、热、应变等物理信号,高效地转换为稳定、可光学读取的荧光与自旋态信号.图 6 和图 7 分别展示了磁场、电场、温度、应力、超精细耦合对 NV 色心能级结构的调制作用及实验上得到的 ODMR 谱图,下文将详细介绍如何利用 NV 色心探测每种外场.

表 1 不同 NV 色心制造工艺的磁场灵敏度

Table 1. Magnetic measurement sensitivity of different NV color center fabrication processes.

NV色心制造工艺	尺寸/mm	相干时间 $T_2/\mu\text{s}$	静态磁场灵敏度/ $(\text{pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2})$	交变磁场灵敏度/ $(\text{pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2})$	文献
离子注入	32	> 200	1×10^5	1×10^4	[65,66,17,67]
CVD生长	60	> 200	0.46	0.21	[53,54,82]
电子束辐照	10	> 600	32	0.9	[75,76,83]
激光直写	33	> 100	63	20	[56,84,12]

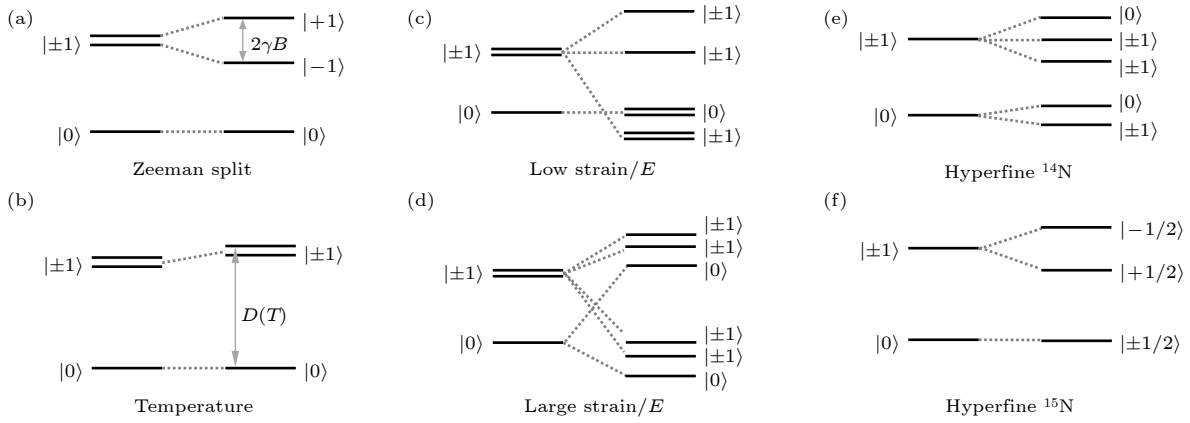


图 6 金刚石 NV 色心在不同外场下的能级结构 (a) 磁场下的塞曼劈裂; (b) 温度对 D 的影响; (c) 低温、弱应力/电场下 3E 的能级结构变化; (d) 低温、强应力/电场下 3E 的能级结构变化; (e) ${}^{14}\text{N}$ 核的超精细耦合作用; (f) ${}^{15}\text{N}$ 核的超精细耦合作用^[85]

Fig. 6. Schematic of NV- electronic structures under different external fields: (a) Zeeman split effect under a magnetic field; (b) effect of temperature on the zero-field splitting parameter D ; at low temperatures, energy level structure of 3E under low (c) and high (d) strain/ E ; hyperfine coupling with the ${}^{14}\text{N}$ (e) and ${}^{15}\text{N}$ (f) nucleus^[85].

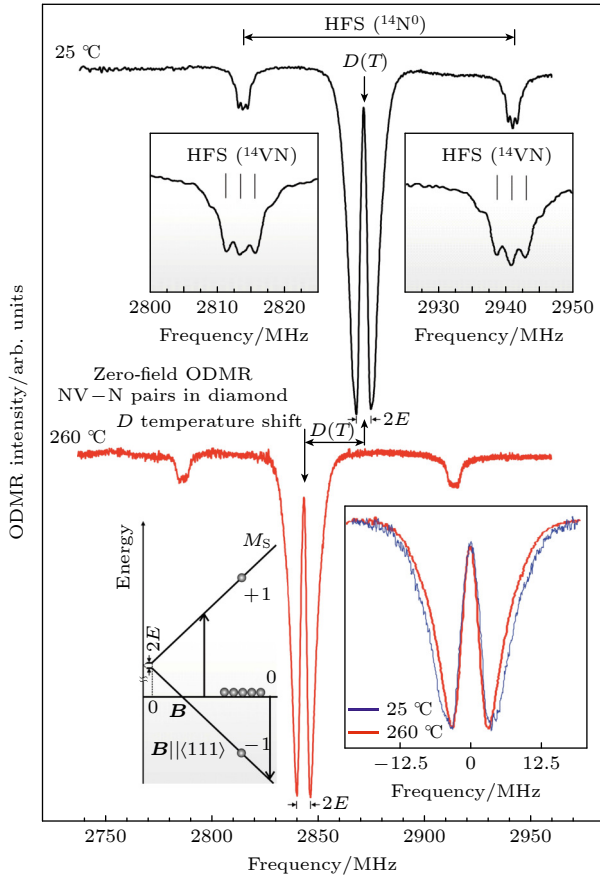


图 7 单晶金刚石经快中子辐照并经 800 °C 退火后, 在零磁场条件下记录的 NV 色心的 ODMR 光谱, 图中清晰展示了温度、磁场、应力和超精细耦合的特征谱线^[86]

Fig. 7. ODMR spectra of NV centers in a single-crystal diamond (fast-neutron-irradiated and annealed at 800 °C) recorded in zero magnetic field, the spectrum clearly displays characteristic signatures of temperature, magnetic field, stress, and hyperfine coupling^[86].

4.1 磁场传感

在众多应用中, NV 色心在磁场传感方面表现最为突出. 基于激光与微波对其自旋态的精确操控, NV 色心能以纳米级的分辨率探测极微弱的磁场, 灵敏度甚至可达单电子和单核子自旋水平. 图 8 为 NV 色心磁探测器和其他磁场探测器的灵敏度和空间分辨率对比, 可以看到, 金刚石 NV 色心探测器具有相当高的灵敏度和空间分辨率, 代表了一种真正的原子级大小的传感器^[87]. 目前利用 NV 色心探测磁场应用较为广泛的是 ODMR 技术, 核心作用是把难以探测的磁共振信号转换成灵敏

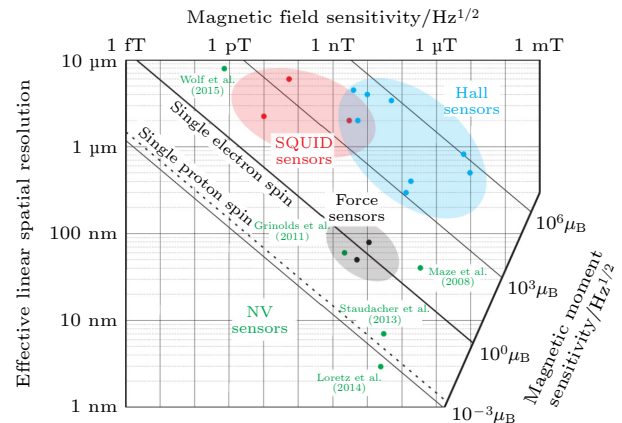


图 8 各种磁场测量方法的灵敏度和空间分辨率的对比, 对角线表示在给定的灵敏度下, 以玻尔磁子为单位探测磁矩所需的截止距离^[87]

Fig. 8. Field sensitivity and spatial resolution for different magnetometers. The diagonal lines represent the standoff required for a given sensitivity to detect magnetic moments in units of the Bohr magneton^[87].

的荧光强度变化信号: 在共振光激发下, NV 从三重态基态激发到三重态激发态, 然后通过辐射跃迁和系间串隙的方式跃迁回基态, 用微波场进行频率扫描, 在 2.87 GHz 处 (对应 $|m_s = \pm 1\rangle$ 与 $|m_s = 0\rangle$ 的能级差) 会导致系间串隙跃迁概率的增加, 观察到荧光特征的下降. 当施加磁场后, $|m_s = \pm 1\rangle$ 的简并态被消除, 荧光峰发生劈裂, 根据劈裂宽度可以确定磁场的强度 [85], 图 6(a) 展示了 $|m_s = \pm 1\rangle$ 能级在磁场下的塞曼劈裂示意图. 如图 7 左下角的示意图, 劈裂大小随磁场强度增大而线性增大.

磁场测量时, NV 色心可以放置在距离样品几纳米近的位置, 较小的距离导致样品与 NV 色心的

相互作用非常强, 进而可实现非常高的灵敏度和原子级空间分辨率, 通过电子的精细相互作用和原子核的超精细相互作用实现单个电子自旋和核自旋的探测. 在纳米尺度上, 由于在拉莫尔频率下发生的自旋噪声具有随机性, 核磁共振信号表现出随机幅度和相位, 通常依赖于动态解耦脉冲方案, 这些方案旨在通过测量核磁场的方差而不是大小来检测自旋噪声 [22,88]. 2008 年, Glenn 等 [12,13] 通过 NV 色心实现了纳米尺度的弱磁场探测, 灵敏度达到 $20 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$; 2012 年, Zhao 等 [89] 采用动力学解耦策略探测到了单个 ^{13}C 的核自旋, 如图 9(a) 所示; 2013 年, Glenn 等 [90] 利用 NV 色心探测到了甲酸

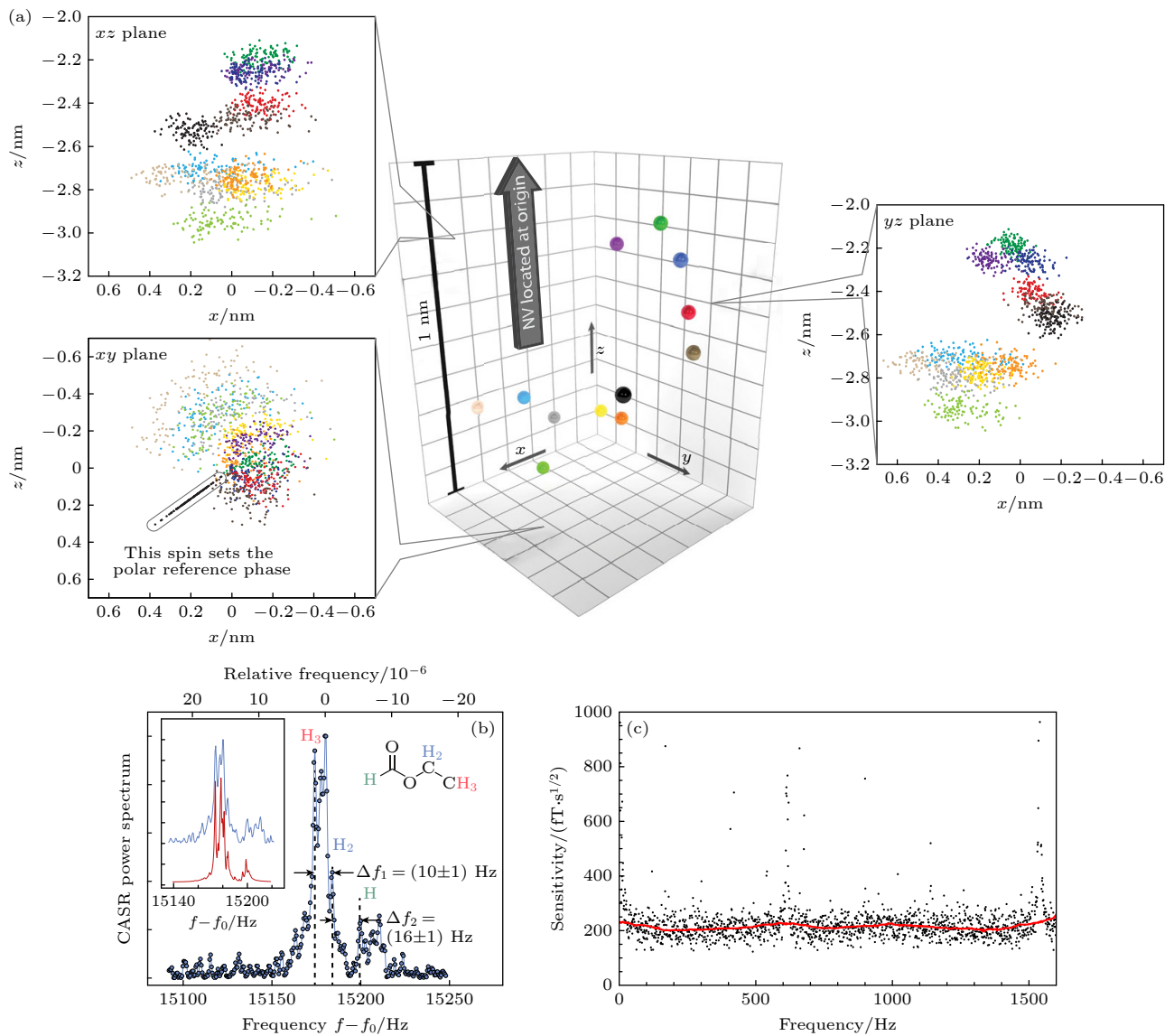


图 9 NV 色心在磁场测量方面的应用 (a) NV 色心探测 CXCR4 中 183 和 185 残基中 ^{13}C 核自旋位置准确性谱图 [89]; (b) 甲酸乙酯的 CASR FNP 谱, 精度达 1 Hz [90]; (c) Hahn 序列探测磁场达到了 $210 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度 [82]

Fig. 9. Applications of NV centers in magnetic field sensing: (a) Spectrum showing the localization accuracy of ^{13}C nuclear spins at residues 183 and 185 in CXCR4 probed by NV centers [89]; (b) measured CASR FNP spectrum of ethylformate with a precision of 1 Hz [90]; (c) magnetic field sensitivity of the Hahn sequence detection reaching $210 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ [82].

乙酯中 H 的自旋谱图, 精度达到 1 Hz, 如图 9(b) 所示; 2020 年, 冯园耀等^[91] 通过光学调控优化, 实现了 $5.6 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的典型磁检测灵敏度; 2024 年, Barry 等^[82] 结合定制金刚石生长技术、双量子拉姆齐和哈恩回波磁力测量序列, 以及 P1 驱动策略将其推进至 $210 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的极限, 如图 9(c) 所示.

4.2 电场传感

NV 色心对电场同样敏感, 其物理根源来源于外加电场会改变缺陷中心的局域晶体场, 发生斯塔克效应. 因为电场耦合比磁场耦合弱了 3—4 个数量级, 因此测量电场的关键是消除外界磁场引起的塞曼劈裂的影响, 同时因为横向电偶极矩比纵向电偶极矩高了 1 个量级, 应尽量利用横向电场耦合. 如图 6(c), (d) 所示, 分别展示了低温下, ^3E 能级在弱电场和强电场下的能级劈裂示意图^[85]. 图 10(a) 展示了利用单个 NV 色心探测原子力显微镜 (AFM)

针尖处电场的示意图^[92]. 2011 年, Dolde 等^[39] 通过施加横向磁场来抑制纵向磁场引起的塞曼劈裂, 实现了 $202 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的交流电场灵敏度, 大致相当于从 35 nm 距离测量到了单个电子电荷. 2012 年, Xu 等^[93,94] 发展了一种利用连续波驱动的动力学解耦方法来抑制磁场噪声: 实验中制备特定的叠加态, 通过 Ramsey 振荡来表征电场引起的能级移动. 2014 年, Dolde 等^[95] 使用一个 NV 色心用作静电计, 成功探测到了 25 nm 处由另一个 NV 色心在其电中性 (NV^0) 和负电荷态 (NV^-) 之间的光学切换引起的单个电子位移产生的电场变化, 如图 10(b) 所示. 2021 年, Bian 等^[92] 实现 NV 色心对另一邻近 NV 色心电荷态的控制, 如图 10(c) 所示.

4.3 温度传感

从 (1) 式可以看出, NV 色心的哈密顿量与温度没有直接的关系, 温度的影响来源于晶格变化

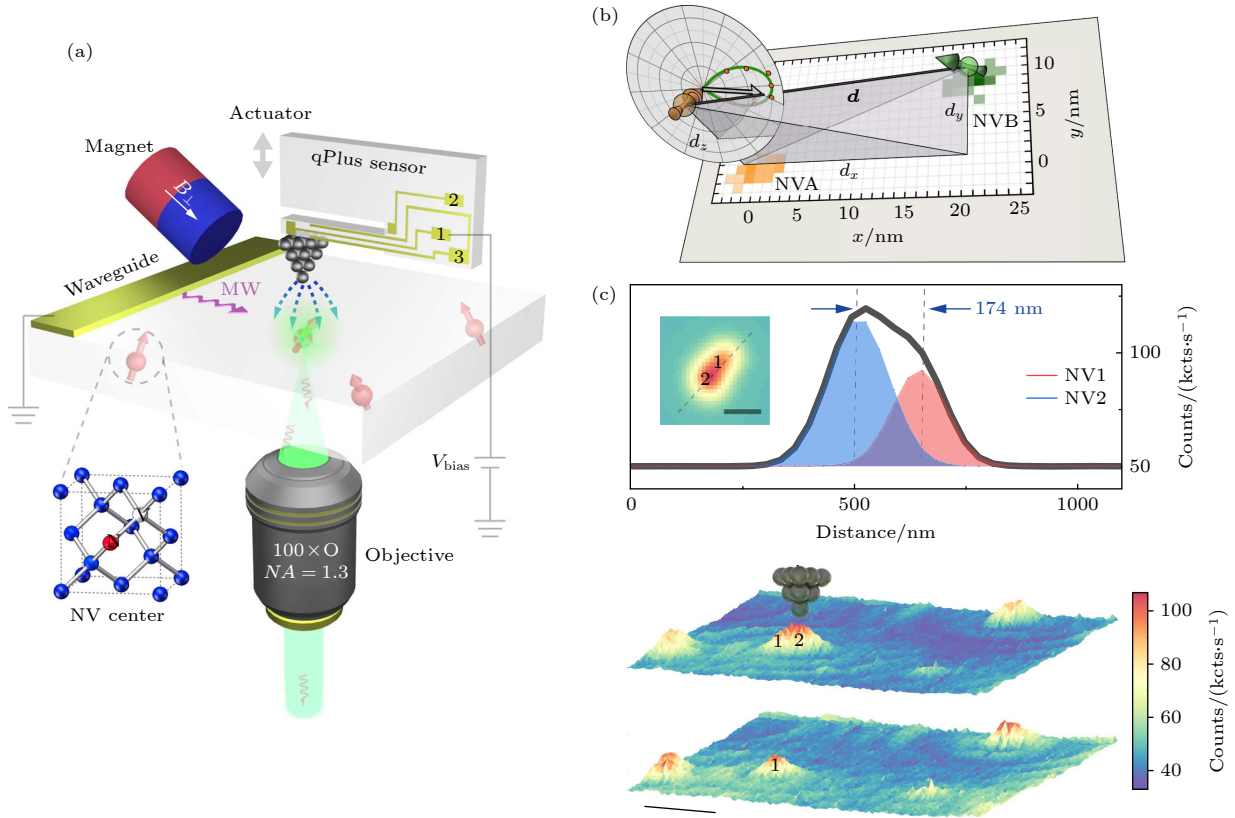


图 10 NV 色心在电场测量方面的应用 (a) 利用单个 NV 色心探测 AFM 针尖处电场的示意图^[92]; (b) 利用 NV 色心探测 $\sim 25 \text{ nm}$ 远的单个电荷^[95]; (c) NV 色心对的电荷控制, NV 色心对的线扫强度图和 Gaussian 拟合, 两个 NV 色心相距 174 nm (上图), 初始 NV 色心对和其中一个不带电后的强度面分布图 (下图)^[92]

Fig. 10. Applications of NV centers in electric field sensing: (a) Schematic diagram of using a single NV center to detect the electric field at an AFM tip^[92]; (b) detection of a single charge located $\sim 25 \text{ nm}$ away using an NV center^[95]; (c) charge state control of an NV center pair. Line-scan intensity profile and Gaussian fit of the NV center pair (separation: 174 nm) (Top); intensity surface plots of the initial NV pair and after one center is converted to a neutral charge state (Bottom)^[92].

对 D 值的影响, 通过测量 D 值的变化来反映温度的变化. 图 6(b) 为温度对 NV 能级结构的影响示意图, $D(T)$ 随温度增加而减小. 图 7 中高温 (黑色谱线) 相对于室温 (红色谱线) 峰位左移, D 值减小. 图 11(a) 为几种温度传感器的灵敏度和空间分辨率对比图, 可以看出, 金刚石 NV 色心在温度精度方面遥遥领先^[18]. 图 11(b) 为体态金刚石和纳米金刚石的 D 值随温度变化的关系^[96], 两者的 D 值都随温度的升高而减小. 2013 年, Kucsko 等^[18] 将金纳米颗粒和金刚石颗粒同时导入细胞内, 在纳米尺度上测量了活细胞中的温度分布, 精度达 $9 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$. 如图 11(c) 所示, 将纳米级的金刚石颗粒与光纤结合在一起或者将金刚石颗粒和 AFM

探头结合, 对芯片温度分布进行测量, 对目前 2 nm 节点的先进集成电路开发有重要的作用^[97]. 表 2 总结了目前利用 NV 色心测量温度灵敏度的相关研究^[98], 通过增大 NV 色心浓度、镶嵌金刚石纳米颗粒、连续波 ODMR(CW ODMR) 等手段, 可以实现 $0.076 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度, 低至 50 nm 的空间分辨率. Li 等^[99] 提出了一个经验公式, 来描述零场劈裂能隙 $E(T)$ 随温度的变化关系:

$$E(T) = E_0 - AT^4/(T + B)^2, \quad (3)$$

式中, E_0 , A 和 B 为拟合参数. 在低温下, $D(T)$ 随温度按四次方变化; 在高温下, $D(T)$ 随温度按二次方变化; 在室温范围内, $D(T)$ 与温度的变化近似成线性.

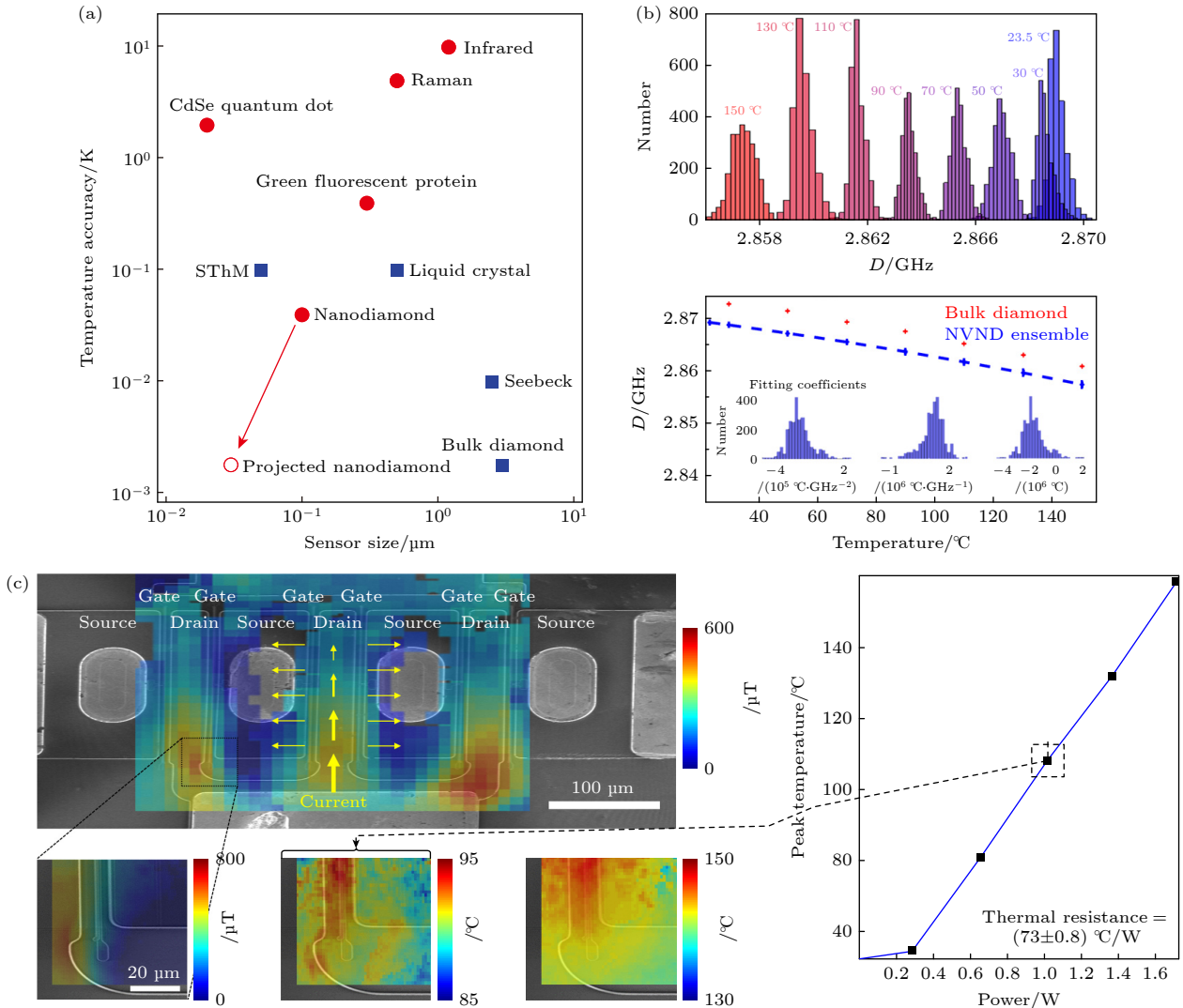


图 11 NV 色心在探测温度方面的应用 (a) 几种温度探测器的灵敏度和空间分辨率对比^[18]; (b) 体态金刚石和纳米金刚石的 D 随温度变化规律^[96]; (c) 利用 NV 色心探测芯片的温度分布^[96]

Fig. 11. Applications of NV centers in temperature sensing: (a) Sensitivity and spatial resolution of several temperature sensors^[18]; (b) temperature dependence of the zero-field splitting parameter D for bulk diamond and nanodiamonds^[96]; (c) temperature mapping of a microchip using NV^[96].

表 2 NV 色心测量温度的灵敏度

Table 2. Temperature measurement sensitivity with NV color centers.

温度灵敏度/($\text{mK}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)	金刚石形态	探针尺寸	测量方法	参考文献
0.076	体相+磁纳米颗粒	1 mm	CW ODMR	[100]
0.1	纳米颗粒	100 nm	CW ODMR	[101]
0.43	体相	2 mm	CW ODMR	[102]
0.76	体相	$0.1\ \mu\text{m}^3$	增加NV色心浓度	[103]
1.6	体相	—	借助磁场消磁	[104]
9	体相	1 mm	Pulsed ODMR	[18]
130	纳米颗粒	50 nm	Pulsed ODMR	[105]

4.4 应力传感

应力与自旋的耦合作用和电场耦合类似, 同样横向应力耦合常数 ($d_{\perp} = (19.63 \pm 0.40)\ \text{GHz}$) 大于纵向应力耦合常数 ($d_{\parallel} = (5.46 \pm 0.31)\ \text{GHz}$)^[106], 如图 6(c), (d) 所示, 分别展示了低温下、 ^3E 能级在弱应力和强应力下的劈裂示意图. 图 7 中的 $2E$ 是由于零磁场下非轴向应力引起的能级劈裂, 右下角的插图表明 E 随温度的升高而减小, 这可能来源于 NV 中心附近晶体中应力的动态平均过程, 以及 NV 中心结构中涉及的与氮的超精细相互作用的平均过程^[86]. 2014 年, Teissier 等^[106,107] 在金刚石悬臂中引入 NV 色心, 确定了体系的自旋-应变耦合

常数, 灵敏度达到 $3 \times 10^{-6}\ \text{strain}/\sqrt{\text{Hz}}$, 在机械驱动下的耦合强度超过 10 MHz. 2022 年, Marshall 等^[108] 运用应变敏感的自旋态干涉测量法实现了微米级空间分辨率、毫米级视场以及 $5 \times 10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}\cdot\mu\text{m}^{-3}}$ 的灵敏度. 这种量子干涉测量技术对电子和核自旋不敏感, 从而实现较长的 NV 去相干时间和应变灵敏度. 图 12 为 Marshall 等^[108] 利用 NV 色心测得的宽场应变分布图.

4.5 量子计算

NV 色心能在室温下实现功能齐全的量子比特, 而且实验上已经实现了创建量子计算机所需的全部部件的功能, 例如量子纠错、量子耦合、量子中

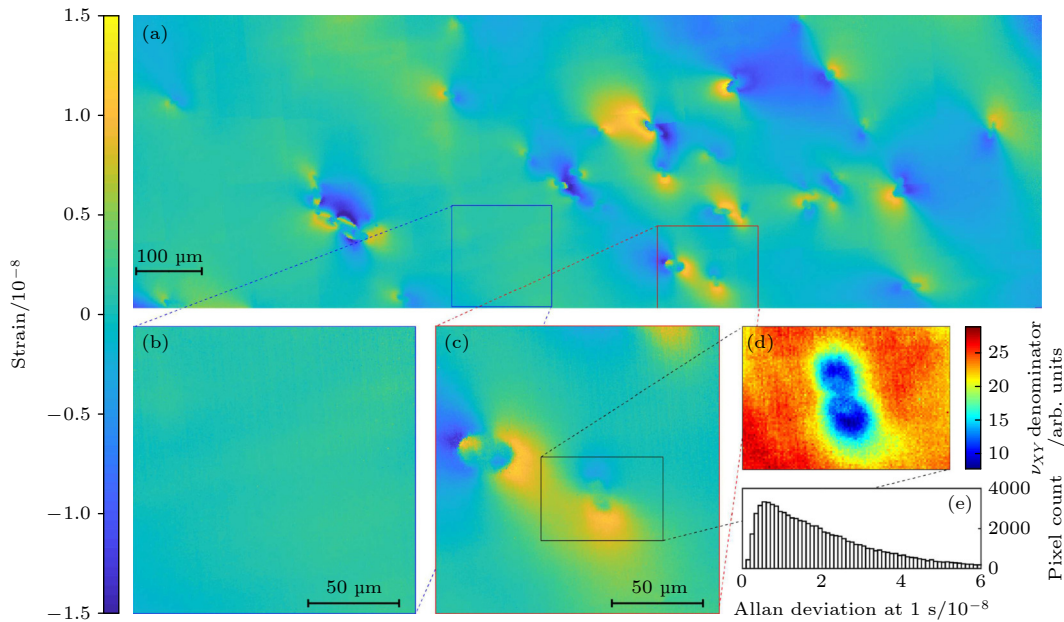


图 12 宽场应变分布图 (a) 应变分布图; (b) 均匀应变区域; (c) 两个应变特征区; (d) 应变梯度缩短了退相干时间; (e) 阿伦偏差统计直方图, 用于评估应变测量的不确定度^[108]

Fig. 12. Wild-field strain image: (a) A wide survey of the strain features; (b) features extremely homogeneous strain, characteristic of this diamond material; (c) showcases two strain features; (d) the denominator of the XY-normalized visibility indicates areas where intrapixel strain gradients degrade the dephasing time; (e) a histogram of the Allan deviations gives an estimate of the strain measurement uncertainty^[108].

继电器. 量子比特的构建方案有多种: 离子阱技术可以实现非常好的量子控制, 但需要极高的真空度, 技术难度非常大; 超导量子比特扩展性好, 但是体积很大, 需要在极低温工作; 而 NV 色心作为量子比特, 在常温、常压下即可工作, 电子自旋 T_1 可达 ms 量级, 通过极化和荧光读出, 具有独特的优势^[109].

在单量子比特方案中, 一般以基态的 $|m_s = 0\rangle$ 能级作为量子比特的 0, 选择 $|m_s = \pm 1\rangle$ 中的一个作为量子比特的 1, 构成电子自旋量子比特. 在双量子比特方案中, 考虑核自旋耦合的超精细作用, 能级发生超精细劈裂, 选取其中两个能级作为另一个量子比特的 0 和 1, 构成核自旋量子比特. NV 色心电子自旋比特和核自旋比特就组成了两比特量子系统^[41]. 图 6(e), (f) 分别展示了 NV 色心与 ^{14}N 和 ^{15}N 的超精细耦合作用, ^{14}N 核自旋为 1, ^{15}N 核自旋为 1/2. 图 7 黑色插图表明室温下 ^{14}N 核超精细耦合引起的 3 个峰位劈裂非常明显.

量子计算的实现需要实现量子比特的可控操作和读取、存储、逻辑运算. 在量子比特门的控制方面, NV 色心体系采用微波脉冲和射频脉冲完成电子自旋比特和核自旋比特的通用量子控制, 通过调节微波脉冲和射频脉冲的频率、幅度、相位和时长

等, 实现 Bloch 球中任意量子态的构建. 研究人员通过多种技术方案, 如动力学纠错门、容错量子逻辑门、时间最优量子控制和可编程量子控制等^[41], 将量子逻辑门的保真度提高到可以进行量子计算的程 度. 在量子比特的存储方面, 2007 年, Dutt 等^[110] 证明了 NV 色心电子自旋和核自旋优异的相干性, 可以用做量子寄存器; 2014 年, Taminiau 等^[111] 通过控制弱耦合的核自旋实现了对多量子比特寄存器的普遍控制, 并证明了这些编码的鲁棒性, 图 13 展示了 Taminiau 等^[111] 由 NV 色心的电子自旋和 ^{13}C 的核自旋间的超精细耦合构成的量子寄存器; 2019 年, Xu 等^[112] 通过将调制激光技术引入 NV 色心制备过程, 将单个强耦合核自旋的极化效率提高到了 98% 以上, 构建了多比特强耦合量子寄存器. 在量子计算的算法开发方面, 2010 年, Shi 等^[113] 在室温下在 NV 色心体系实现了 Deutsch-Jozsa 量子算法; 2020 年, Zhang 等^[114] 在单个 NV 色心的混合量子寄存器中实现了量子算法演示的整个过程, 包括纯态的制备、Grover 量子搜索算法的实现和输出态的重建; 2023 年, Zhang 等^[115] 提出了一种新的量子态断层扫描方案, 可以从一系列不同观测中重构未知的量子态, 大大缩短了总体测量时间.

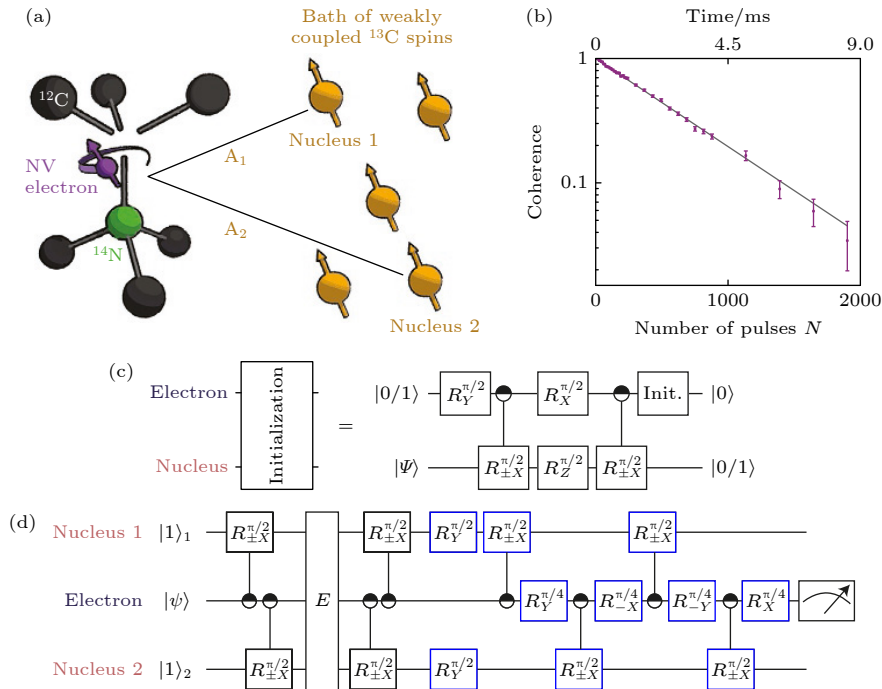


图 13 NV 色心构成的多比特寄存器 (a) NV 色心的电子自旋和 ^{13}C 的核自旋间的超精细耦合构成了量子寄存器; (b) 电子相干性与总序列长度的关系; (c) 通过交换电子态实现核自旋初始化; (d) 量子纠错协议序列^[111]

Fig. 13. Multi-bit register formed by NV center: (a) Quantum register formed by the NV electron spin and weakly coupled ^{13}C nuclear spins; (b) electronic coherence as a function of total sequence length; (c) nuclear spin initialization by swapping the electron state; (d) quantum-error-correction protocol^[111].

4.6 生物与医学应用

由于金刚石的生物无毒特性, 对其进行表面功能化处理后使其与生物相容, 便可发挥出 NV 色心量子传感技术的超灵敏特性、超高空间分辨特性在生物医学方面的巨大应用潜力. 图 14(a) 总结了金刚石表面功能化的几种方案^[2]. 过去十年, 研究者在细胞、模式动物乃至临床样本中, 把 NV 色心的

三大本领——超分辨成像、纳米级磁共振和多物理场传感——转化为一系列颠覆性的生物医学工具. Fujiwara 等^[116]开发了基于 NV 的显微镜系统, 以 $\pm 0.22\text{ }^\circ\text{C}$ 的精度对秀丽隐杆线虫体内的温度进行了实时监控; Kucsko 等^[18]探测了细胞内不同区域的温度分布, 如图 14(b) 所示; Fujisaku 等^[117]通过探测纳米金刚石表面电荷态的变化实现了对

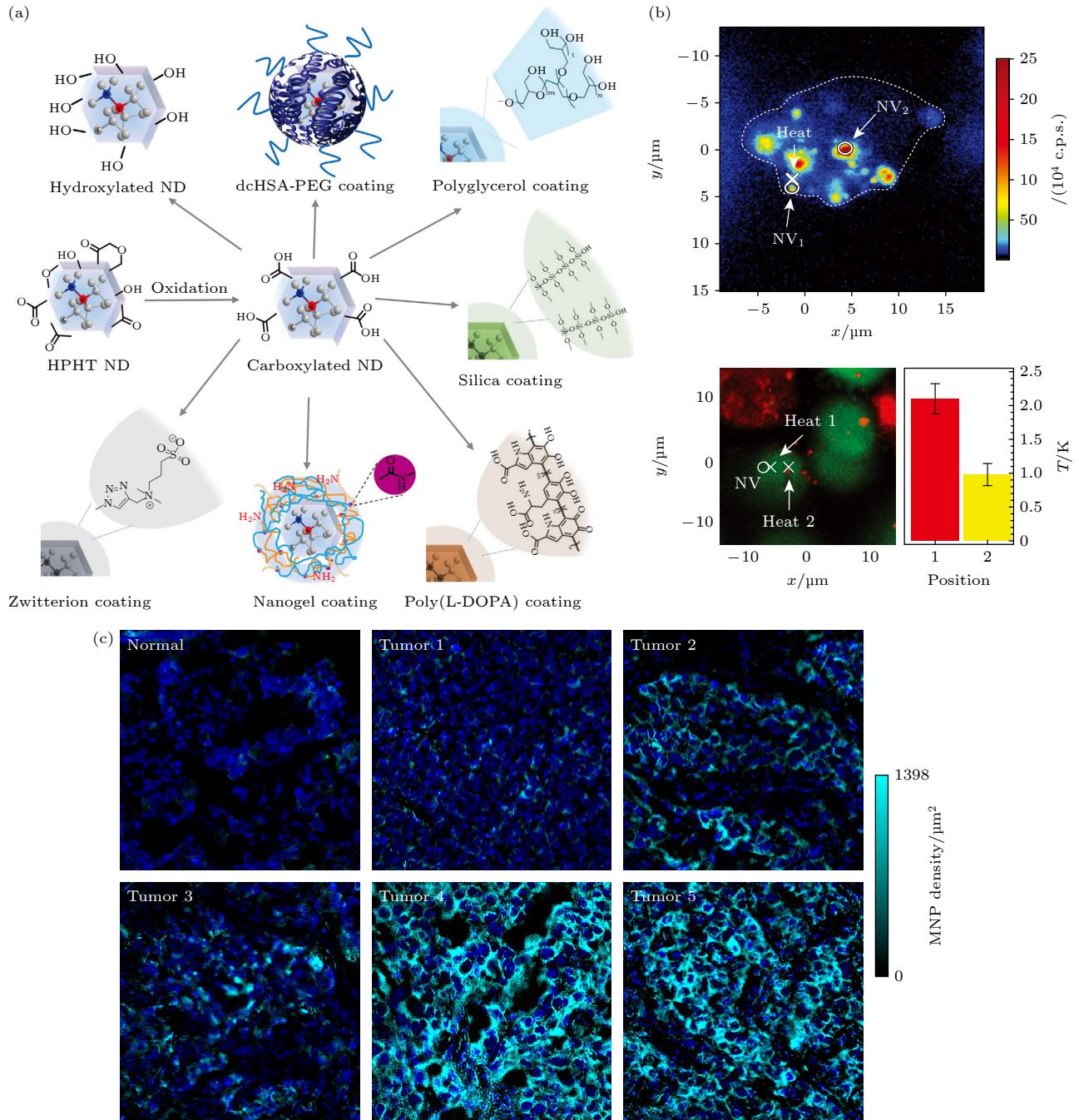


图 14 NV 色心在生物方面的应用 (a) 纳米金刚石的表面功能化^[2]; (b) 细胞中的温度分布图^[18]; (c) 重构的正常肺组织和 5 种肺肿瘤组织的磁场分布图^[119]

Fig. 14. Applications of NV centers in biology: (a) Surface functionalization of nanodiamonds^[2]; (b) intracellular temperature mapping^[18]; (c) reconstructed magnetic field maps of healthy lung tissue and five types of lung tumor tissue^[119].

环境中 pH 值的测量; Hall 等^[118]利用 NV 色心实现了毫秒级时间分辨率和微米级空间分辨率且无创地对平面神经元活动产生的磁场进行了成像; Chen 等^[119]利用 NV 色心重构对比了正常肺组织和肿瘤肺组织的磁场分布图, 如图 14(c) 所示; Glenn 等^[120]利用 NV 显微镜成功在单细胞水平上探测到了大量健康细胞中罕见癌细胞表达的癌症生物标志物, 有利于癌症的早期监测。

5 总结和展望

金刚石中的氮-空位 (NV) 色心, 凭借其室温下毫秒量级的电子自旋相干时间、原子尺度的空间分辨能力以及可达皮特斯拉水平的极限磁场灵敏度, 在众多固态量子体系中确立了独特地位。其载体金刚石, 具有极致的物理化学稳定性和卓越的生物兼容性, 使得 NV 色心能在生命体内进行原位、无扰的动态探测。这些集“高性能”与“好兼容性”于一身的“超级指标”, 使其成功跨越了物理、生物与工程学科的界限, 成为实现高精度量子传感与成像的理想载体。

近年来, 通过离子注入、电子束辐照与飞秒激光直写等技术的持续迭代, 高品质 NV 色心阵列的制备已迈入“定位精度优于百纳米、阵列规模达千像素”的实用化阶段, 为实现并行量子传感奠定了基础。与此同时, 将 NV 色心与光子晶体、片上波导及微波谐振腔等微纳结构相集成, 已成为提升其性能与可操作性的主流方向。这种集成化设计不仅大幅压缩了系统体积、提升了光子收集效率, 还增强了局域场与控制效率, 有效推动了 NV 传感系统从庞大复杂的实验室装置向紧凑稳健的模块化仪器演进, 为其走出实验室、应用于真实场景扫清了障碍。

基于上述进展, NV 色心已在多个前沿领域展现价值: 在基础科学中, 用于探测低维材料的磁畴结构与拓扑激发; 在生命科学中, 实现对活细胞内温度、离子浓度及神经元电活动的纳米级成像; 在工程技术中, 作为非侵入式探针用于半导体芯片的温度测绘与缺陷分析。

展望未来, 加速 NV 色心迈向广泛应用的核心路径将聚焦于两大方向: 一是追求极限性能, 通过同位素纯化金刚石、优化脉冲序列等手段来延长相干时间、提升灵敏度; 二是推动系统集成, 借助微纳

加工与微机电工艺, 实现传感单元的芯片化、阵列化与便携化。此外, 与人工智能算法的深度融合, 将极大提升其数据通量与智能决策能力。通过多学科协作与技术融合, NV 色心量子传感器有望演进为一种通用型高精度探测平台, 深刻影响从量子信息处理、工业无损检测到生物医学诊断等诸多领域。

参考文献

- [1] Xiang Z L, Ashhab S, You J Q, Nori F 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 623
- [2] Wu Y K, Weil T 2022 *Adv. Sci.* **9** 2200059
- [3] Bian K, Gerber C, Heinrich A J, Müller D J, Scheuring S, Jiang Y 2021 *Nat. Rev. Methods Primer* **1** 36
- [4] Binnig G, Rohrer H, Gerber Ch, Weibel E 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 57
- [5] Wang L, Xia Y, Ho W 2022 *Science* **376** 401
- [6] Lv B, Qian T, Ding H 2019 *Nat. Rev. Phys.* **1** 609
- [7] Zhang C F, Li Y W, Pei D, Liu Z K, Chen Y L 2020 *Annu. Rev. Mater. Res.* **50** 131
- [8] Zhang Y, Ahammed B, Bae S H, Lee C H, Huang J, Hossain M A, Rakib T, van der Zande A M, Ertekin E, Huang P Y 2025 *Science* **389** 423
- [9] Chen Z, Jiang Y, Shao Y T, Holtz M E, Odstrčil M, Guizar-Sicairos M, Hanke I, Ganschow S, Schlom D G, Muller D A 2021 *Science* **372** 826
- [10] Gruber A, Dräbenstedt A, Tietz C, Fleury L, Wrachtrup J, Borczykowski C V 1997 *Science* **276** 2012
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Rose B C, Huang D, Zhang Z H, Stevenson P, Tyryshkin A M, Sangtawesin S, Srinivasan S, Loudin L, Markham M L, Edmonds A M, Twitchen D J, Lyon S A, de Leon N P 2018 *Science* **361** 60
- [15] Hamlin J J, Zhou B B 2019 *Science* **366** 1312
- [16] Siyushev P, Nesladek M, Bourgeois E, Gulka M, Hruba J, Yamamoto T, Trupke M, Teraji T, Isoya J, Jelezko F 2019 *Science* **363** 728
- [17] Maletinsky P, Hong S, Grinolds M S, Hausmann B, Lukin M D, Walsworth R L, Loncar M, Yacoby A 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 320
- [18] Kucsko G, Maurer P C, Yao N Y, Kubo M, Noh H J, Lo P K, Park H, Lukin M D 2013 *Nature* **500** 54
- [19] Wu W, Davis E J, Hughes L B, Ye B, Wang Z, Kufel D, Ono T, Meynell S A, Block M, Liu C, Yang H, Bleszynski Jayich A C, Yao N Y 2025 *Nature* **646** 74
- [20] Ajoy A, Bissbort U, Lukin M D, Walsworth R L, Cappellaro P 2015 *Phys. Rev. X* **5** 011001
- [21] Kaufmann S, Simpson D A, Hall L T, Perumicic V, Senn P, Steinert S, McGuinness L P, Johnson B C, Ohshima T, Caruso F, Wrachtrup J, Scholten R E, Mulvaney P, Hollenberg L 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **110** 10894
- [22] Sushkov A O, Lovchinsky I, Chisholm N, Walsworth R L,

- Park H, Lukin M D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 197601
- [23] Fujiwara M, Shikano Y 2021 *Nanotechnology* **32** 482002
- [24] Marchiori E, Ceccarelli L, Rossi N, Lorenzelli L, Degen C L, Poggio M 2022 *Nat. Rev. Phys.* **4** 49
- [25] Rovny J, Gopalakrishnan S, Jayich A C B, Maletinsky P, Demler E, de Leon N P 2024 *Nat. Rev. Phys.* **6** 753
- [26] Nagl A, Hemelaar S R, Schirhagl R 2015 *Anal. Bioanal. Chem.* **407** 7521
- [27] Schirhagl R, Chang K, Loretz M, Degen C L 2014 *Annu. Rev. Phys. Chem.* **65** 83
- [28] Casola F, Van Der Sar T, Yacoby A 2018 *Nat. Rev. Mater.* **3** 17088
- [29] Rizzato R, von Grafenstein N R, Bucher D B 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 260502
- [30] Shang Y X, Hong F, Dai J H, Yu H, Lu Y N, Liu E K, Yu X H, Liu G Q, Pan X Y 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 086201
- [31] Zhang X R, Zhuang X Y, Liu X B 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 047601
- [32] Li S, Li C H, Zhao B W, Dong Y, Li C C, Chen X D, Ge Y S, Sun F W 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 096101
- [33] Chen D S, Chen G W, Lv L, Dong J J, Shang Y C, Hou X Y, Wang Y, Shang J Q, Wang S S, Yin Y K, Liu R, Zhang W, Jiang Z, He Y, He B C, Mao C W, Zhu S C, Sundqvist B, Liu B B, Yao M G 2025 *Nat. Mater.* **24** 513
- [34] Yang L X, Lau K C, Zeng Z D, Zhang D Z, Tang H, Yan B M, Niu G L, Gou H Y, Yang Y P, Yang W G, Luo D, Mao H kwang 2025 *Nature* **644** 370
- [35] Jeske J, Lau D W M, Vidal X, McGuinness L P, Reineck P, Johnson B C, Doherty M W, McCallum J C, Onoda S, Jelezko F, Ohshima T, Volz T, Cole J H, Gibson B C, Greentree A D 2017 *Nat. Commun.* **8** 14000
- [36] Chou J P, Bodrog Z, Gali A 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 136401
- [37] Barry J F, Schloss J M, Bauch E, Turner M J, Hart C A, Pham L M, Walsworth R L 2020 *Rev. Mod. Phys.* **92** 015004
- [38] Van Oort E, Glasbeek M 1990 *Chem. Phys. Lett.* **168** 529
- [39] Dolde F, Fedder H, Doherty M W, Nöbauer T, Rempp F, Balasubramanian G, Wolf T, Reinhard F, Hollenberg L C L, Jelezko F, Wrachtrup J 2011 *Nat. Phys.* **7** 459
- [40] Bauch E, Hart C A, Schloss J M, Turner M J, Barry J F, Kehayias P, Singh S, Walsworth R L 2018 *Phys. Rev. X* **8** 031025
- [41] Li T W, Rong X, Du J F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 060304 (in Chinese) [李廷伟, 荣星, 杜江峰 2022 物理学报 **71** 060304]
- [42] Bauch E, Singh S, Lee J, Hart C A, Schloss J M, Turner M J, Barry J F, Pham L M, Bar-Gill N, Yelin S F, Walsworth R L 2020 *Phys. Rev. B* **102** 134210
- [43] Redman D A, Brown S, Sands R H, Rand S C 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3420
- [44] Ryan C A, Hodges J S, Cory D G 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 200402
- [45] Abtew T A, Sun Y Y, Shih B C, Dev P, Zhang S B, Zhang P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 146403
- [46] Hao Y C, Yang Z P, Li Z Y, Kong X, Tang W N, Xie T Y, Xu S Y, Ye X Y, Yu P, Wang P F, Wang Y, Qiao Z H, Gao L B, Jiang J H, Shi F Z, Du J F 2025 *Natl. Sci. Rev.* **12** nwaf076
- [47] Chrostoski P, Sadeghpour H R, Santamore D H 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 064056
- [48] Dobrzhinetskaya L F 2012 *Gondwana Res.* **21** 207
- [49] Fu J, Nakamuro T, Nakamura E 2025 *Science* **389** 1024
- [50] Fan Q Q, Gao Y, Zhao Y G, Yang Q L, Guo L, Jiang L 2018 *Mater. Lett.* **215** 242
- [51] Jing J X, Sun F Q, Wang Z Q, Ma L J, Luo Y M, Du Z Y, Zhang T Y, Wang Y C, Xu F, Zhang T T, Chen C S, Ma X H, He Y, Zhu Y, Sun H R, Wang X Q, Zhou Y, Tsoi J K H, Wrachtrup J, Wong N, Li C, Ki D K, Wang Q, Li K H, Lin Y, Chu Z Q 2024 *Nature* **636** 627
- [52] Orwa J O, Greentree A D, Aharonovich I, Alves A D C, Van Donkelaar J, Stacey A, Praver S 2010 *J. Lumin.* **130** 1646
- [53] Widmann C J, Giese C, Wolfer M, Brink D, Heidrich N, Nebel C E 2015 *Diam. Relat. Mater.* **54** 2
- [54] Neu E, Appel P, Ganzhorn M, Miguel-Sánchez J, Lesik M, Mille V, Jacques V, Tallaire A, Achard J, Maletinsky P 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 153108
- [55] McLellan C A, Myers B A, Kraemer S, Ohno K, Awschalom D D, Bleszynski Jayich A C 2016 *Nano Lett.* **16** 2450
- [56] Chen Y C, Salter P S, Knauer S, Weng L, Frangeskou A C, Stephen C J, Ishmael S N, Dolan P R, Johnson S, Green B L, Morley G W, Newton M E, Rarity J G, Booth M J, Smith J M 2017 *Nat. Photonics* **11** 77
- [57] Pezzagna S, Naydenov B, Jelezko F, Wrachtrup J, Meijer J 2010 *New J. Phys.* **12** 065017
- [58] Lagomarsino S, Markešević N, Rashid Z, Flatae A M, Mägdefessel S, Hernández-Gómez S, Bianchini G, Sledz F, Gelli N, Giuntini L, Massi M, Sciortino S, Corsi C, Cimalla V, Knittel P, Kunzer M, Bellini M, Fabbri N, Agio M 2025 *Diam. Relat. Mater.* **158** 112632
- [59] Iakoubovskii K, Kiflawi I, Johnston K, Collins A, Davies G, Stesmans A 2003 *Phys. B Condens. Matter* **340–342** 67
- [60] Talapatra S, Cheng J Y, Chakrapani N, Trasobares S, Cao A, Vajtai R, Huang M B, Ajayan P M 2005 *Nanotechnology* **17** 305
- [61] Davies G 1992 *Phys. Rev. B* **46** 13157
- [62] Van Dam S B, Walsh M, Degen M J, Bersin E, Mouradian S L, Galiullin A, Ruf M, Ijspeert M, Taminiua T H, Hanson R, Englund D R 2019 *Phys. Rev. B* **99** 161203
- [63] Naydenov B, Reinhard F, Lämmle A, Richter V, Kalish R, D'Haenens-Johansson U F S, Newton M, Jelezko F, Wrachtrup J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 242511
- [64] Haque A, Sumaiya S 2017 *J. Manuf. Mater. Process.* **1** 6
- [65] Wang J F, Feng F P, Zhang J, Chen J H, Zheng Z C, Guo L P, Zhang W L, Song X R, Guo G P, Fan L L, Zou C W, Lou L R, Zhu W, Wang G Z 2015 *Phys. Rev. B* **91** 155404
- [66] Schröder T, Trusheim M E, Walsh M, Li L, Zheng J, Schukraft M, Sipahigil A, Evans R E, Sukachev D D, Nguyen C T, Pacheco J L, Camacho R M, Bielejec E S, Lukin M D, Englund D 2017 *Nat. Commun.* **8** 15376
- [67] Chakraborty T, Lehmann F, Zhang J, Borgsdorf S, Wöhrl N, Remfort R, Buck V, Köhler U, Suter D 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 065205
- [68] Tallaire A, Collins A T, Charles D, Achard J, Sussmann R, Gicquel A, Newton M E, Edmonds A M, Cruddace R J 2006 *Diam. Relat. Mater.* **15** 1700
- [69] Ohashi K, Rosskopf T, Watanabe H, Loretz M, Tao Y, Hauert R, Tomizawa S, Ishikawa T, Ishi-Hayase J, Shikata S, Degen C L, Itoh K M 2013 *Nano Lett.* **13** 4733
- [70] Achard J, Silva F, Brinza O, Tallaire A, Gicquel A 2007 *Diam. Relat. Mater.* **16** 685
- [71] Achard J, Jacques V, Tallaire A 2020 *J. Phys. Appl. Phys.* **53** 313001
- [72] Samlenski R, Haug C, Brenn R, Wild C, Locher R, Koidl P 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2798
- [73] Ondič L, Varga M, Hruška K, Fait J, Kapusta P 2017 *ACS Nano* **11** 2972
- [74] Chapman R, Plakhotnik T 2011 *Chem. Phys. Lett.* **507** 190
- [75] Mindarava Y, Blinder R, Laube C, Knolle W, Abel B, Jentgens C, Isoya J, Scheuer J, Lang J, Schwartz I, Naydenov B, Jelezko F 2020 *Carbon* **170** 182

- [76] Ohno K, Joseph Heremans F, Bassett L C, Myers B A, Toyli D M, Bleszynski Jayich A C, Palmström C J, Awschalom D D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 082413
- [77] Zaitsev A M, Moe K S, Wang W 2017 *Diam. Relat. Mater.* **71** 38
- [78] Capelli M, Heffernan A H, Ohshima T, Abe H, Jeske J, Hope A, Greentree A D, Reineck P, Gibson B C 2019 *Carbon* **143** 714
- [79] York A G, Milchberg H M, Palaastro J P, Antonsen T M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 195001
- [80] Shi L P, Li W X, Wang Y D, Lu X, Ding L E, Zeng H P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 095004
- [81] Ju Z P, Lin J J, Shen S, Wu B T, Wu E 2021 *Adv. Phys. X* **6** 1858721
- [82] Barry J F, Steinecker M H, Alsid S T, Majumder J, Pham L M, O'Keeffe M F, Braje D A 2024 *Phys. Rev. Appl.* **22** 044069
- [83] Rubinas O R, Soshenko V V, Bolshedvorskii S V, Zelenev A I, Galkin A S, Tarelkin S A, Troschiev S Y, Vorobyov V V, Sorokin V N, Sukhanov A A, Vins V G, Smolyaninov A N, Akimov A V 2021 *Results Phys.* **21** 103845
- [84] Chen Y C, Griffiths B, Weng L, Nicley S S, Ishmael S N, Lekhai Y, Johnson S, Stephen C J, Green B L, Morley G W, Newton M E, Booth M J, Salter P S, Smith J M 2019 *Optica* **6** 662
- [85] Doherty M W, Manson N B, Delaney P, Jelezko F, Wrachtrup J, Hollenberg L C L 2013 *Phys. Rep.* **528** 1
- [86] Babunts R A, Kramushchenko D D, Gurin A S, Bundakova A P, Muzafarova M V, Badalyan A G, Romanov N G, Baranov P G 2020 *Phys. Solid State* **62** 2024
- [87] Ashley T 2021 *Ph. D. Dissertation* (Nottingham: University of Nottingham)
- [88] Mamin H J, Kim M, Sherwood M H, Rettner C T, Ohno K, Awschalom D D, Rugar D 2013 *Science* **339** 557
- [89] Zhao N, Honert J, Schmid B, Klas M, Isoya J, Markham M, Twitchen D, Jelezko F, Liu R B, Fedder H, Wrachtrup J 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 657
- [90] Glenn D R, Bucher D B, Lee J, Lukin M D, Park H, Walsworth R L 2018 *Nature* **555** 351
- [91] Feng Y Y, Li Z H, Zhang Y, Cui L X, Guo Q, Guo H, Wen H F, Liu W Y, Tang J, Liu J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 147601 (in Chinese) [冯园耀, 李中豪, 张扬, 崔凌霄, 郭浩, 温煥飞, 刘文耀, 唐军, 刘俊 2020 物理学报 **69** 147601]
- [92] Bian K, Zheng W T, Zeng X Z, Chen X K, Stöhr R, Denisenko A, Yang S, Wrachtrup J, Jiang Y 2021 *Nat. Commun.* **12** 2457
- [93] Xu X K, Wang Z X, Duan C K, Huang P, Wang P F, Wang Y, Xu N Y, Kong X, Shi F Z, Rong X, Du J F 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 070502
- [94] Li R, Kong F, Zhao P J, Cheng Z, Qin Z Y, Wang M Q, Zhang Q, Wang P F, Wang Y, Shi F Z, Du J F 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 247701
- [95] Dolde F, Doherty M W, Michl J, Jakobi I, Naydenov B, Pezzagna S, Meijer J, Neumann P, Jelezko F, Manson N B, Wrachtrup J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 097603
- [96] Foy C, Zhang L, Trusheim M E, Bagnall K R, Walsh M, Wang E N, Englund D R 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 26525
- [97] Zhang S C, Dong Y, Du B, Lin H B, Li S, Zhu W, Wang G Z, Chen X D, Guo G C, Sun F W 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 044904
- [98] Lin H B, Zhang S C, Dong Y, Zheng Y, Chen X D, Sun F W 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 060302 (in Chinese) [林豪彬, 张少春, 董杨, 郑瑜, 陈向东, 孙方稳 2022 物理学报 **71** 060302]
- [99] Li C C, Gong M, Chen X D, Li S, Zhao B W, Dong Y, Guo G C, Sun F W 2017 *Diam. Relat. Mater.* **74** 119
- [100] Liu C F, Leong W H, Xia K, Feng X, Finkler A, Denisenko A, Wrachtrup J, Li Q, Liu R B 2021 *Natl. Sci. Rev.* **8** nwaal194
- [101] Wang N, Liu G Q, Leong W H, Zeng H, Feng X, Li S H, Dolde F, Fedder H, Wrachtrup J, Cui X D, Yang S, Li Q, Liu R B 2018 *Phys. Rev. X* **8** 011042
- [102] Wojciechowski A M, Karadas M, Osterkamp C, Jankuhn S, Meijer J, Jelezko F, Huck A, Andersen U L 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 013502
- [103] Hayashi K, Matsuzaki Y, Taniguchi T, Shimo-Oka T, Nakamura I, Onoda S, Ohshima T, Morishita H, Fujiwara M, Saito S, Mizuochi N 2018 *Phys. Rev. Appl.* **10** 034009
- [104] Zhang S C, Li S, Du B, Dong Y, Zheng Y, Lin H B, Zhao B W, Zhu W, Wang G Z, Chen X D, Guo G C, Sun F W 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 4634
- [105] Neumann P, Jakobi I, Dolde F, Burk C, Reuter R, Waldherr G, Honert J, Wolf T, Brunner A, Shim J H, Suter D, Sumiya H, Isoya J, Wrachtrup J 2013 *Nano Lett.* **13** 2738
- [106] Teissier J, Barfuss A, Appel P, Neu E, Maletinsky P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 020503
- [107] Ovarthaiyapong P, Lee K W, Myers B A, Jayich A C B 2014 *Nat. Commun.* **5** 4429
- [108] Marshall M C, Ebadi R, Hart C, Turner M J, Ku M J H, Phillips D F, Walsworth R L 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 024041
- [109] Pezzagna S, Meijer J 2021 *Appl. Phys. Rev.* **8** 011308
- [110] 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
- [111] Taminiau T H, Cramer J, van der Sar T, Dobrovitski V V, Hanson R 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 171
- [112] Xu N Y, Tian Y, Chen B, Geng J P, He X X, Wang Y, Du J F 2019 *Phys. Rev. Appl.* **12** 024055
- [113] Shi F Z, Rong X, Xu N Y, Wang Y, Wu J, Chong B, Peng X H, Kniepert J, Schoenfeld R S, Harneit W, Feng M, Du J F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 040504
- [114] Zhang J F, Hegde S S, Suter D 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 030501
- [115] Zhang J F, Hegde S S, Suter D 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 090801
- [116] Fujiwara M, Sun S, Dohms A, Nishimura Y, Suto K, Takezawa Y, Oshimi K, Zhao L, Sadzak N, Umehara Y, Teki Y, Komatsu N, Benson O, Shikano Y, Kage-Nakadai E 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba9636
- [117] Fujisaku T, Tanabe R, Onoda S, Kubota R, Segawa T F, So F T K, Ohshima T, Hamachi I, Shirakawa M, Igarashi R 2019 *ACS Nano* **13** 11726
- [118] Hall L T, Beart G C G, Thomas E A, Simpson D A, McGuinness L P, Cole J H, Manton J H, Scholten R E, Jelezko F, Wrachtrup J, Petrou S, Hollenberg L C L 2012 *Sci. Rep.* **2** 401
- [119] Chen S Y, Li W H, Zheng X H, Yu P, Wang P F, Sun Z T, Xu Y, Jiao D F, Ye X Y, Cai M C, Shen M Z, Wang M Q, Zhang Q, Kong F, Wang Y, He J, Wei H M, Shi F Z, Du J F 2022 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119** e2118876119
- [120] Glenn D R, Lee K, Park H, Weissleder R, Yacoby A, Lukin M D, Lee H, Walsworth R L, Connolly C B 2015 *Nat. Methods* **12** 736

SPECIAL TOPIC—Semiconductor physics and devices

Nitrogen-vacancy centers in diamond: From fundamental principles to quantum sensing*

LI Yuehui¹⁾ CHENG Shaobo^{1)2)†} SHAN Chongxin¹⁾²⁾1) (*Institute of Quantum Materials and Physics, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China*)2) (*Henan Key Laboratory of Diamond Materials and Devices, Key Laboratory of Integrated Circuit,**Ministry of Education, School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China*)

(Received 10 November 2025; revised manuscript received 9 December 2025)

Abstract

The nitrogen-vacancy (NV) center in diamond has quickly developed into one of the most versatile and dynamic solid-state quantum platforms, encompassing condensed matter physics, emerging quantum technologies, nanoscience, and life sciences. This prominence stems from its unique combination of properties: Millisecond-scale spin coherence at room temperature, atomic-scale spatial resolution, non-invasive and non-destructive operation, remarkable chemical stability, excellent biocompatibility, and the tunable coupling strength to multiple physical fields. Its electron spin can be efficiently initialized by laser illumination and precisely manipulated via microwave resonance, enabling high-sensitivity detection of magnetic and electric fields, temperature, stress, and spin signals, with some experiments already achieving single-nuclear-spin or single-electron-charge resolution. In this review, we start with a brief overview of the fundamental properties of the NV center, clarifying the influences of spin-orbit coupling, hyperfine interactions, and other key effects on its energy level structure. We then systematically outline the fabrication methods for creating NV centers with high spatial control and spectral quality. Finally, we provide a detailed exposition of how NV centers are used for nanoscale sensing and measurement across various physical domains, highlighting both established protocols and recent experimental advances. Through this structured presentation, the review aims to provide a coherent and up-to-date resource for researchers exploring the interdisciplinary potential of diamond NV centers.

Keywords: nitrogen-vacancy centers, quantum sensing, fabrication, application

DOI: [10.7498/aps.75.20251531](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251531)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251531](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251531)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52572052, 12504007) and the Science and Technology Innovation Leading Talent Program of Henan Province, China (Grant No. 254000510060).

† Corresponding author. E-mail: chengshaobo@zzu.edu.cn



金刚石氮空位色心：从基本原理到量子探测

李跃辉 程少博 单崇新

Nitrogen–vacancy centers in diamond: From fundamental principles to quantum sensing

LI Yuehui CHENG Shaobo SHAN Chongxin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 080702 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251531

CSTR: 32037.14.aps.75.20251531

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251531>

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

基于金刚石氮–空位色心的温度传感

Temperature sensing with nitrogen vacancy center in diamond

物理学报. 2022, 71(6): 060302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211822>

碳离子注入金刚石制备氮空位色心的机理

Generation of shallow nitrogen–vacancy centers in diamond with carbon ion implantation

物理学报. 2022, 71(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220794>

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>

极端条件下的金刚石自旋量子传感

Diamond spin quantum sensing under extreme conditions

物理学报. 2022, 71(6): 066101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212072>

金刚石氮–空位色心单电子自旋的电场驱动相干控制

Coherent electrical control of single electron spin in diamond nitrogen–vacancy center

物理学报. 2022, 71(11): 117601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220410>

微波等离子化学气相沉积法制备高浓度金刚石–空位色心及其性能研究

High–concentration diamond nitrogen vacancy color center fabricated by microwave plasma chemical vapor deposition and its properties

物理学报. 2025, 74(2): 028102 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241438>