

# 金刚石NV色心在量子测量领域的应用研究

豆亚芳

郑州信大先进技术研究院 河南郑州 450001

**摘要:** 量子测量为利用量子资源和效应, 实现超越经典方法的测量精度, 是原子物理、物理光学、电子技术、控制技术等多学科交叉融合的综合技术。外界的电磁场、温度、压力等物理因子会改变声、光、电等微观粒子的量子态, 通过对这些变化后微观粒子的量子态进行测量, 进而实现对外界物理量的测量。目前, 金刚石NV色心是量子测量技术其中一种重要的物理载体, 其具有的优质属性包括: 相干时间长, 性质稳定, 光学可读取, 常温可操作等, 同时金刚石NV色心还可以对电场、磁场、应力、温度等多个基础物理量进行非破坏性地测量, 可见金刚石NV色心在量子测量方面有很大的研究价值。

**关键词:** 金刚石; NV色心; 量子测量; 物理量

## 引言

NV色心是金刚石中的一种点缺陷。金刚石晶格中缺失一个碳原子形成空位, 近邻的位置存在一个氮原子, 这样就构造出一个NV色心。我们这里所说的NV色心, 指的是带负电荷 $NV^-$ 顺磁中心, 由于 $NV^-$ 在受到外界环境影响时会出现明显的变化<sup>[1]</sup>, 因此 $NV^-$ 在量子精密测量领域广泛应用。

在 $NV^-$ 中存在两个不成对电子, 现有技术中不仅可以采用光探测磁共振 (Optically Detected Magnetic Resonance, ODMR) 技术对NV色心处于能级上的电子进行其自旋态的初始化以及在后续需要采集信号时读出电子的自旋态, 还可以将微波信号微波输入NV色心实现对电子的自旋态的操做与控制。基于NV色心的量子测量装置制造成本低, 是因为NV色心的正常工作温度处于容易达到的温度, 在其正常工作温度下NV色心有较长的相干时间以发挥其最高性能, 同时, NV色心在空间分辨率和灵敏度上极具优势, 因此NV色心在量子测量领域方面极具潜力。

## 1 金刚石NV色心的量子测量原理

采用金刚石NV色心进行量子测量的原理<sup>[2]</sup>如图1所示: 下图晶体结构中, 单个NV色心是一个简单的二能级体系, 包括处于最低能级、稳定状态下的基态和活跃状态下的激发态两个能级, 并且基态和激发态都是自旋三重态, 电子可以在基态和激发态之间进行跃迁, 基态电子吸收能量跃迁到激发态, 激发态的电子释放能量回到基态。外界存在有物理场的时候, 会影响电子的自旋态,

通过电子在基态和激发态的自旋信息反应物理场的信息, 进而实现各物理场的测量。为了实现量子逻辑门, 需要对NV色心自旋的状态进行操控。调控NV色心自旋态使用的是自旋磁共振技术, 即利用微波场与自旋的相互作用, 来调控自旋态的演化。

如图1所示, 量子测量装置包括光学系统、微波系统、微波天线、NV色心传感头、上位机。光学系统包括: 用于发射特定频率光源的激光器、用于反射光的反射镜、用于汇聚光的凸透镜、用于调节光偏振的半波片、用于调制频率的AOM、用于双向通过光的二向色镜、物镜、荧光透镜、光电探测器等。微波系统包括用于发出微波信号的AWG、用于进行信号放大的功率放大器、用于辐射信号的微波天线等。

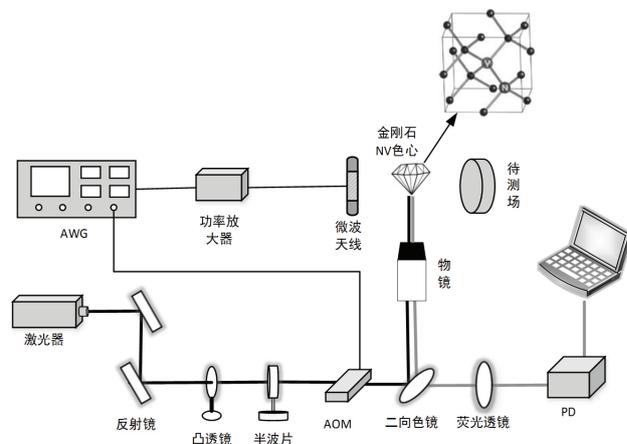


图1 测量原理图

## 2 基于金刚石NV色心的量子测量应用

对于金刚石NV色心, 外界的电磁场、温度、压力

等物理量因素会改变其量子态，因此对外界物理量的测量如图2所示，包括磁场、温度场、力学场、电场等。

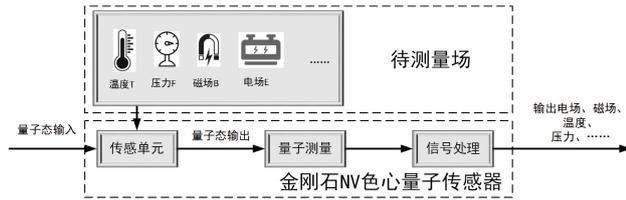


图2 测量应用领域框图

### 2.1 磁场测量

使用激光器发出特定频率的光照射到NV色心，进而激发NV色心，激发NV色心被激发后会释放能量，能量以荧光的形式发射出，采集荧光信号并对其进行测量，这里荧光信号参数能够体现出磁场的大小，荧光信号参数包括其强度和频率；采集到荧光信号后，对荧光信号进行处理和分析，便可以得到磁场的信息。

使用激光器发出特定频率的光照射到NV色心，采集NV色心发出的荧光信号，其散粒噪声极限灵敏度  $N_s$  表达式如下：

$$N_s = \delta B_{SN} \sqrt{\tau_m} \approx \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{h}{g_e \mu_b} \frac{\Delta\nu}{T\sqrt{F}};$$

其中， $T$  为ODMR的信号对比度， $F$  为荧光探测速率， $\Delta\nu$  为ODMR谱的线宽。

### 2.2 温度场测量

温度场测量的装置与磁场测量的装置基本相同，只是外界的物理量更换，将磁场变成温度场，进而反应温度场中荧光信号参数也随之改变，反应温度场的参数是测量零场劈裂D的位移，因为零场劈裂的D值和外界环境的温度T是近似为线性变化的，为： $dD/dT=74.2\text{kHz}/\text{K}$ 。因此，我们通过对零场劈裂D值的测量即可实现对温度场的测量，即温度探测灵敏度  $\eta_r$  的计算过程为：

$$\eta_r \sim \frac{\Delta\nu}{dD/dT \cdot C_{cw} \sqrt{R}};$$

其中， $\Delta\nu$  为ODMR光探测磁共振的线宽， $C_{cw}$  为ODMR光探测磁共振的对比度， $R$  为信号强度或者是荧光强度。

### 2.3 力学场测量

力学场测量的基本原理与磁场、温度场的测量原理相近：金刚石中的点缺陷NV色心，由于其电子自旋能级分布对所受应力敏感的特性，有潜力对所处局部应力大小进行测量。由于NV色心同时也作为磁传感单元，因此能够与磁成像设备合为一体进行无损应力测量。测量过程为依靠应力场影响下NV色心简并能级  $m_s = \pm 1$  的微弱

劈裂，利用光探测磁共振（ODMR）技术测量出分裂子能级间的能级差，继而通过推算得到该点局部应力大小。

### 2.4 电场测量

金刚石NV色心电场测量利用了其自旋性质，通过精确调整磁场，将电感应转换与磁波动解耦，提供了一种传感器从“磁性”模式切换到“电性”模式的方法，通过探索塞曼位移、局部应变效应和基态自旋流形的斯塔克位移之间的相互作用，并利用对这种相互作用的更好理解来感知电场。

2011年，斯图加特大学物理研究所和研究中心的Dolde等<sup>[3]</sup>利用金刚石中单个氮-空位缺陷中心自旋进行精密的三维电场测量，交流电场灵敏度达到了  $202 \pm 6 \text{Vcm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 。2022年，哈佛大学的Qiu等<sup>[4]</sup>利用位于钻石纳米柱顶端的浅层NV来成像自然条件下外部的交流（alternating current, AC）和直流（direct current, DC）电场，AC电场传感灵敏度为  $26 \text{mV} \mu\text{m}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ ，DC电场灵敏度为  $2 \text{V} \mu\text{m}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 。

### 总结与展望

在物理科研、地磁导航、军事国防、工业检测等应用领域，基于金刚石NV色心的量子测量均有较好的兼容性。金刚石NV色心磁力计可能会成为科学研究、无损探伤方面使用的主要量子传感器，因其生物相容性好，空间识别能力强，是目前各学术团队、各国家提及频次高、受关注度高、发展较快的技术。金刚石NV色心传感尚未实现物理上的极限，诸多团队正为之努力，它有望成为新一代量子测量器。

### 参考文献

- [1] 蓝子桁, 谢一进, 荣星. 基于金刚石氮-空位色心的磁力计概述. 导航与控制, 第21卷第5/6期, 2022年12月.
- [2] 张一幸. 基于金刚石色心的交变磁场精密测量. 中国科技大学博士学位论文, 2018年5月.
- [3] DOLDE F, DOHERTY M W, MICHL J, et al. Nanoscale detection of a single fundamental charge in ambient conditions using the NV-center in diamond[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(9):097603.
- [4] QIU Z, HAMO A, VOOL U, et al. Nanoscale electric field imaging with an ambient scanning quantum sensor microscope [J]. NPJ Quantum Information, 2022, 8(1): 107.