动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250429004

量子传感关键技术研究综述

张贤宇[1]，任青颖[1,2*]，陈　畅[1]，顾艳丽[1]，付丽丽[1]，郝学元[1]，李　卫[2,3]

（南京邮电大学 1. 电子与光学工程学院、柔性电子（未来技术）学院，南京 210023；2. 南通研究院，江苏 南通 226001；3. 集成电路科学与工程学院（产教融合学院），南京 210023）

摘　要： 量子传感是利用量子系统、量子特性或量子现象来测量物理量的技术，其核心是基于微观粒子状态的操控和读取，即利用量子态的叠加性、相干性、纠缠性与隧穿性，突破经典传感器的物理极限，实现对磁场、重力、温度等物理量的高精度测量。文章聚焦量子传感方向，围绕量子传感中的微观粒子以及材料综述了其技术发展情况。在粒子体系层面重点讨论了中性原子、囚禁离子、色心粒子和光量子等四大粒子体系基本原理及其在量子传感中的应用。在材料层面讨论了硅基材料、第三代半导体材料、铌酸锂材料和二维材料四种材料体系。针对新型量子材料设计、芯片级集成、多体纠缠增强的技术方向进行展望，为推动量子传感技术的研究提供参考。

关键词： 量子传感；量子芯片技术；量子传感器材料

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0575－12

Review of Key Technologies in Quantum Sensing Research

ZHANG Xianyu[1], REN Qingying[1,2], CHEN Chang[1], GU Yanli[1], FU Lili[1], HAO Xueyuan[1], LI Wei[2,3]

(1. College of Electronic and Optical Engineering, College of Flexible Electronics, Nanjing 210023, CHN; 2. Nantong Research Institute, Nantong 226001, CHN; 3. School of Integrated Circuit Science and Engineering (School of Industry-Education Integration), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, CHN)

Abstract: Quantum sensing is a technology that uses quantum systems, quantum properties or quantum phenomena to measure physical quantities. The core of quantum sensing lies in the manipulation and reading of the states of microscopic particles, that is, by taking advantage of the superposition, coherence, entanglement and tunneling properties of quantum states, it breaks through the physical limits of classical sensors and achieves high-precision measurements of physical quantities, such as magnetic fields, gravity, and temperature. This paper focuses on the direction of quantum sensing and reviews the technological development of particles and materials in quantum sensing. The basic principles of four major particle systems, namely neutral atoms, trapped ions, color center particles, and light quanta, and their applications in quantum sensing are discussed at the particle system level. Four material systems, namely silicon-based materials, third-generation semiconductor materials, lithium niobate materials, and two-dimensional materials, are discussed at the material level. This paper presents technical directions for the design of new quantum materials, chip-level integration, and multibody entanglement enhancement, providing a reference for future

收稿日期：2025－04－28.

基金项目：国家自然科学基金（61904089）；江苏省自然科学基金（BK20190731）；东南大学MEMS教育部重点实验室开放研究基金资助课题项目（SEUMEMS202403）；南京邮电大学教学改革研究项目（JG02024JX52）；教育部产学合作协同育人项目（240905789241136）.

* **通信作者：**任青颖

research on quantum sensing technology.

Key words: quantum sensing; quantum chip technology; quantum sensor materials

0 引言

高精度、高灵敏度和高分辨率的传感器是推动现代科技发展的关键基石，在精密测量、导航定位、环境监测、生物医学成像以及国防安全等领域具有不可替代的作用。然而，传统传感器技术受限于经典物理原理，其性能已逐渐逼近理论极限，难以满足日益增长的精密测量需求。

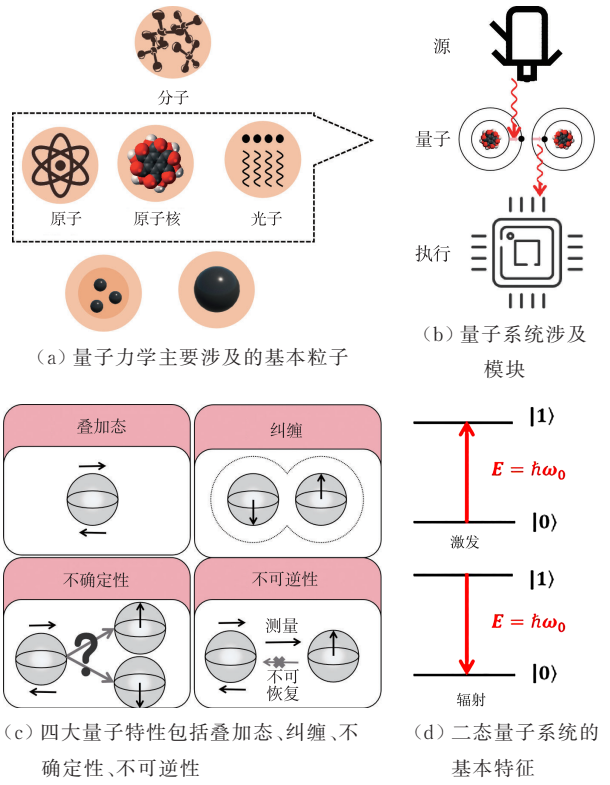
量子传感器通过量子叠加态、纠缠态以及相干效应等微观量子态的操控可以实现突破经典极限的高精度测量。其核心应用包括量子雷达、量子时频同步、原子钟、重力仪、陀螺仪、电磁场测量、微波电场探测、温度传感和压力传感等。这些技术在高精度导航、时间同步、环境监测和国防安全等领域具有重要价值，可显著提升传统传感器的性能极限，丰富传感器的应用场景。然而在实际应用中量子传感器仍面临诸多问题，如系统噪声干扰、环境适应性及工程化可行性验证等[1]。

本文将围绕“粒子-材料”两大核心维度，系统综述量子传感领域关键核心技术进展与发展趋势。在粒子体系层面重点讨论了中性原子、囚禁离子、色心粒子和光量子等四大粒子体系基本原理及其在量子传感中的应用。在材料层面讨论了硅基材料、第三代半导体材料、铌酸锂材料和二维材料四种材料体系。针对新型量子材料设计、芯片级集成、多体纠缠增强的技术方向进行展望，为推动量子传感技术的研究提供参考。

1 量子传感定义

美国国家标准与技术研究院（NIST）在2022年发布的技术文件《Bringing Quantum Sensors to Fruition》中，将量子传感器定义为利用量子力学特性（如原子能级、光子态或基本粒子的自旋）进行计量的设备[2]。量子系统作为量子传感器需要满足的四个准则包括[3]：

（1）具有离散、可分辨的能级。即至少是一个二能级系统，具有较低能级态和较高能级态，能级之间的过渡能$E=\hbar\omega_0$。如图1为量子传感的原理示意图，具体给出了量子传感中的粒子类型，以及其对应的器件模块，其中$|0\rangle$为较低能态（基态），$|1\rangle$为较高能态（激发态）。可以看到量子传感利用跃迁频率ω_0或跃迁速率Γ的变化来响应外部信号V。



（a）量子力学主要涉及的基本粒子　（b）量子系统涉及模块

（c）四大量子特性包括叠加态、纠缠、不确定性、不可逆性　（d）二态量子系统的基本特征

图1 量子传感原理示意图

（2）具备已知且可读取的初始化基态。

（3）可以通过时间依赖性的场（如交变的电场）进行相干操纵。此条件非必须条件，在连续波光谱或弛豫率测量中，即便缺乏此类外场，仍可进行系统的状态操纵。

（4）系统状态与待测物理量的变化有固定的耦合或转导关系，如能量状态∂E随相关物理量变化∂V转移或转化可表示为$\gamma=\partial^q E/\partial V^q$。其中，$q=1$表示线性关系，$q=2$的二次关系（由此类推）。

2 量子传感的粒子分类

量子传感的技术核心在于对微观粒子量子态的精确操控与高保真读出[4]，图1（a）给出了量子力学中涉及的基本粒子。对微观粒子量子态的制备、操控、以及感测执行三个方面是量子传感对的工作过程，如图1（b）所示。量子传感技术较传统原理的

传感器，能够具备颠覆性的传感能力，即低噪声、高灵敏度、低不确定度、高可重复性等，其核心原因是微观粒子状态具有叠加态、纠缠、不确定性和不可逆性，如图 1(c)所示，不同粒子体系在能级结构、相干性质和外场响应等方面的差异，决定了其适用的传感机制和性能表现的不同。本文将会对量子传感体系中的中性原子、囚禁离子、色心粒子、光子四大粒子进行讨论。

2.1　中性原子

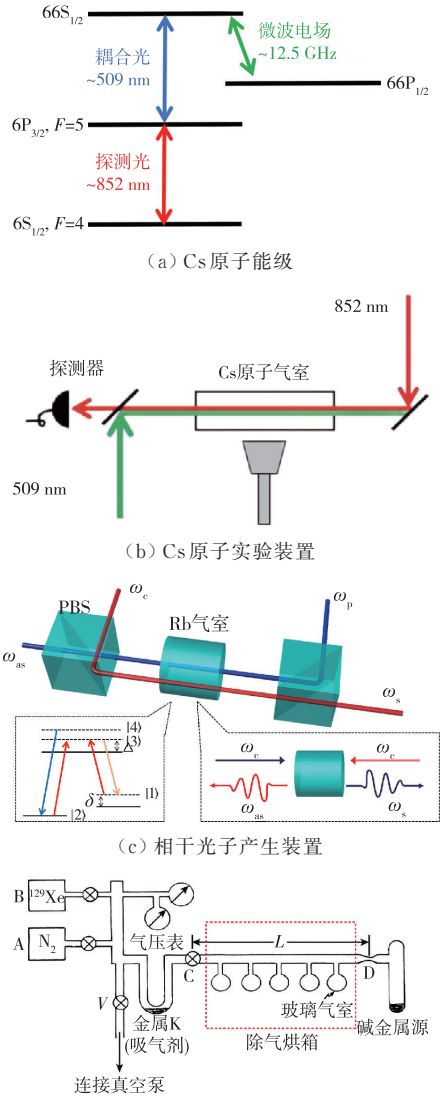
中性原子的基态自旋态由电子与核自旋耦合而成，呈电中性，不受静电干扰。根据其物理实现方式，可分为原子蒸气与冷原子云两类。

2.1.1　原子蒸汽

原子蒸气是将碱金属原子加热至气态后，利用其基态自旋进行量子操控，具有良好的可读性和可控性。碱金属原子（如 Li，Na，K，Rb，Cs）具有单电子外层结构，最外层电子与原子核的自旋耦合形成基态自旋，通过强自旋选择性光学偶极跃迁将 s 波电子基态与 p 波第一激发态连接起来，可实现光场、磁场、碰撞等方式进行信号感知的功能。如图 2(a)给出了 Cs 原子能级以及跃迁波长。

早在 1957 年，Bell 等基于光泵浦（Optical Pumping，OP）原理实现了原子磁力计[5]。1955 年，Essen 等设计实现基于气态 Cs 原子的原子钟[6]。1960 年，Maiman 等设计出红宝石激光器[7]，极大地推动了原子蒸气光谱与磁场、电场、频率等多物理量高灵敏检测的发展。2003 年，Kominis 等基于自旋交换弛豫自由（Spin Exchange Relaxation Free，SERF）原理开发的原子磁力计，在低磁场、高原子密度下有效抑制自旋弛豫，磁灵敏度达到 $10^{-5}\ \mathrm{T}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 量子[8]。除磁场测量外，原子蒸气还可应用于电场探测，并展现出良好的灵敏度与应用前景。2010 年，Saffman 等提出利用高激发里德堡原子的极化特性和斯塔克效应，实现对微弱电场的检测，在微波成像、天线测量等领域展现出应用潜力[9]。2024 年，Li 等设计实现的原子蒸气原子磁强计具有超高测量灵敏度（低于 $1\ \mathrm{fT}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$），已成功应用于人体极弱磁功能成像、物质极弱磁性分析、前沿基础物理学研究等领域[10]。

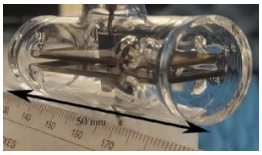
原子蒸汽实验装置包括探测光、泵浦光、微波电场、探测器和原子气室等组件，如图 2(b)所示给出 Cs 原子实验装置为例；图 2(c)为 Cs 原子相干光子产生装置，其组件包括 PBS、原子气室、透镜等光学元件；图 2(d)是普林斯顿大学的原子蒸汽设备，包括气压表、除气烘箱、真空泵、吸气剂、玻璃气室、碱金属源等组成部分。



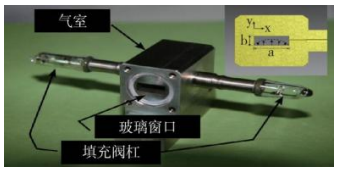
(a) Cs 原子能级　(b) Cs 原子实验装置　(c) 相干光子产生装置　(d) 美国普林斯顿大学的原子蒸汽设备示意图

图 2　原子蒸汽技术原理及原型机示例

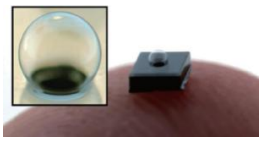
为了满足不同应用需求，原子气室在结构设计上不断演化[11-14]，如图 3 为比较典型的四种气室，从最初的圆柱形蒸气室到芯片级的硅基原子气室。随着微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，MEMS）与微封装技术的发展，原子蒸汽设计呈现高灵敏、小型化发展趋势。Knappe 等实现的芯片级原子钟（Chip Scale Atomic Clock，CSAC）原型机，将微型铷蒸气腔体、加热器与光学元件集成于毫米尺度结构中，实现了 10^{-11} 量级的频率稳定性[15]。



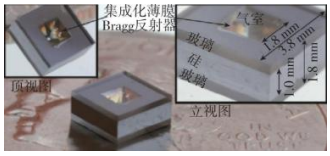
（a）圆柱形蒸气室[11]



（b）具有波导尺寸的矩形气室[12]



（c）微球形原子气室[13]



（d）倒金字塔结构原子气室[14]

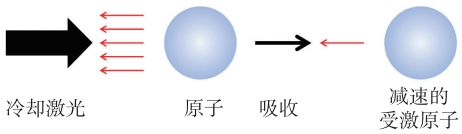
图3 不同形状的原子气室

2.1.2 冷原子云

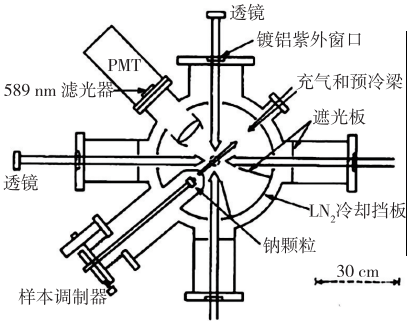
冷原子云是指通过激光冷却（Laser Cooling）、磁光俘获（Magneto-Optical Trap，MOT）和蒸发冷却（Evaporative Cooling，EC）等技术，将中性原子冷却至微开尔文甚至纳开尔文量级所形成的量子气体体系。在此温度下，原子的热运动速度被抑制至1 m/s以下，热噪声降低，玻色-爱因斯坦凝聚、量子纠缠等量子效应显现。由于原子波函数的空间相干长度超过粒子间距，形成宏观量子态，进而可以实现量子操控。当冷原子云达到量子简并条件时，玻色子将发生玻色-爱因斯坦凝聚，费米子受泡利不相容原理限制，通过费什巴赫共振（Feshbach Resonance）调控s波散射长度可实现超流配对。

最初在1987年，Raab等通过磁光俘获装置，实现了对冷原子云的有效约束[16]。1988年，Lett等在钠原子实验中观测到40 μK的超低温现象，不仅突破了多普勒冷却极限240 μK的理论边界，更逼近反冲极限温度（2.4 μK）[17]。1991年，Keith等首次构建了基于中性钠原子束和纳米光栅的原子干涉仪，实现了物质波干涉条纹的直接观测[18]。2013年NIST/JILA团队实现了镱原子钟，其稳定性约为10^{-18}数量级，频率测量的短期稳定性远超微波原子钟，比此前公布的其他原子钟的最佳结果大约高出10倍[19]。2024年，Xia等利用激光冷原子方法制备成基于自旋的薛定谔猫态，其寿命达到分钟量级，提升至1.4×10^3 s[20]。2025年，Zhai等使用冷原子干涉仪完成机载绝对重力测量[21]。

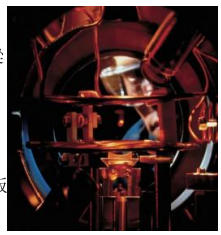
图4（a）为多普勒冷却示意图，由于运动原子因多普勒效应感知频率升高而优先吸收对向光子，获得反向动量，实现冷却效果。图4（b）为多普勒冷却方案实验设备图。图中钠原子束，经过frequency-chirped激光预冷减速。关闭激光后，钠原子会移动到六束两两成对的正交反向传播激光束的交叉点，六个方向的激光实现对原子在三维空间的均匀冷却，使原子在各个方向上都获得足够的反向动量，从而达到更低的温度。该系统可用于干涉测量（如马赫-曾德尔型原子干涉仪）、超精密频率计量（如光学晶格钟）以及弱场探测（如引力梯度计）。



（a）多普勒冷却一维示意图



（b）用于多普勒冷却实验的真空室、交叉激光束和原子束示意图



（c）美国国家标准局的菲利普斯小组在六束交叉的激光区域观测到钠原子云

图4 激光冷却技术

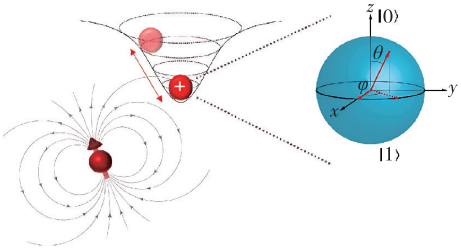
2.2 囚禁离子

囚禁离子技术是指在超高真空环境中通过电磁场实现对离子的三维空间束缚，其原理是基于时变四极电场（如Paul阱）或静电磁场组合（如Penning阱）构建势阱，克服恩绍定理的限制，在超高真空中实现离子的三维空间束缚。离子作为量子传感粒子，探测方式可以随着离子数目增加其振动频谱密集化，结合光刻微型阱阵列或分区域囚禁技术即可实现可控扩展。由于离子的微米级小尺寸使其具备亚波长分辨率优势，进而弥补了绝对灵敏度低于原子蒸汽的短板。离子基态自旋子能级对外场高度敏感，通过偶极跃迁与电场强耦合，结合激光冷却技术将离子运动模式冷却至量子基态，量子化能级间隔达到兆赫兹量级，通过测量离子平衡位置偏移可探测表面电荷涨落实现高精度测量。这种系统具有极低的环境噪声干扰和长达秒级的量子相干时间，为精密测量提供了

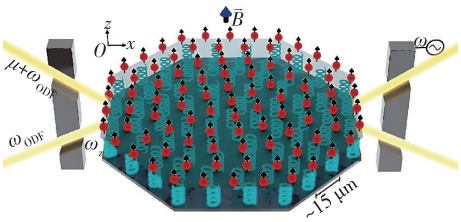
理想平台。

2016 年，Biercuk 等设计的囚禁离子磁场传感，其灵敏度可达 4.6 pT/$\sqrt{\text{Hz}}$ 以及 300 fT 的最小响应值[22]。2017 年，Campbell 等提出一种基于囚禁离子的旋转传感器新理论，该理论利用萨格纳克干涉效应实现旋转测量[23]。2021 年，Gilmore 等使用约 150 个囚禁离子来探测位移和电场，实现了低于标准量子极限 8.8±0.4 dB 的位移灵敏度，以及在 1 s 内测量 240±10 nV/m 的电场灵敏度[24]。2022 年罗乐团队通过射频-光双模纠缠测量技术实现对极微弱调制直流力的测量，把微弱直流力的测量扩展到仄（10^{-21}）牛顿范围[25]。2024 年黄学人等通过测量囚禁在同一个离子阱中的 Ca^+ 和 Al^+ 离子的光频移之比，高精度确定了 Al^+ 离子钟跃迁的极化率之差这一学术难题，这项技术适合于任何离子光钟黑体辐射频移研究[26]。近年来出现光晶格调控增强原子囚禁效率，将原子囚禁寿命延长至分钟量级[20]；针对 ^{6}Li 原子因质量轻、能级不可分辨导致常规冷却效果不佳的难题，2023 年 Wu 等利用紫外激光磁光阱结合亚反冲冷却技术，成功突破多普勒冷却极限，将 ^{6}Li 原子温度降至 16 μK[27]。

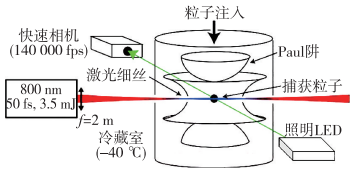
囚禁离子技术凭借其量子态可控性、环境鲁棒性及多维传感能力，已成为量子精密测量领域的核心平台。图 5(a)给出的离子被限制在一个由电场和磁场形成的势阱中。通过操控外部电磁场，可以精确控制离子的运动状态，进而实现量子态的操控。蓝色小球为量子态的布洛赫球，其中 |0〉 和 |1〉 分别表示基态和激发态，角度 θ 和 ϕ 用于描述量子态在布洛赫球上的位置。



(a) 带正电的离子被电磁场捕获的情景



(b) Be 离子排列成二维晶格



(c) Paul 阱测试系统示意图

图 5　囚禁离子技术

从图 5(b)可以看到，局限在 Penning 陷阱内的红色铍离子 Be 集合自排列成二维三角形晶格。图 5(c)给出了囚禁离子的实验过程，利用探测激光与离子相互作用，将离子发射的荧光信号收集，可以观察到离子信号受暗态、微波、磁场、激光偏振变化而变化。但单离子荧光信号极其微弱，对成像系统的成像位置、激光的位置、激光的频率极其敏感，需经过长期、反复的优化与调节。随着多离子操控、芯片集成和混合系统技术的突破，囚禁离子技术在基础物理研究、工业检测与国防安全等领域的应用前景将更加广阔。

2.3　色心粒子

固态材料掺杂会带来空位，形成缺陷即空位缺陷复合物（X-V 中心），特别在宽禁带半导体中，色心缺陷因具有自旋与光学性质，既有类似于传统原子系统的量子特性，又有独特的光学与自旋物理特性，被广泛应用于高灵敏度量子传感领域。

2.3.1　金刚石色心

超宽禁带材料金刚石 E_g=5.47 eV 的低核自旋浓度使其成为色心研究的理想材料。其低核自旋环境可以减少自旋-自旋相互作用，从而延长电子自旋的相干时间[28]。1997 年，德国开姆尼茨大学 Jörg Wrachtrup 团队首次通过光学探测磁共振（ODMR）技术，在常温下实现了单个氮空位（NV）色心的自旋态操控与荧光读出[29]，标志着金刚石量子技术领域的突破。金刚石的色心家族非常丰富，其中一些重要的色心类型可归纳如下：

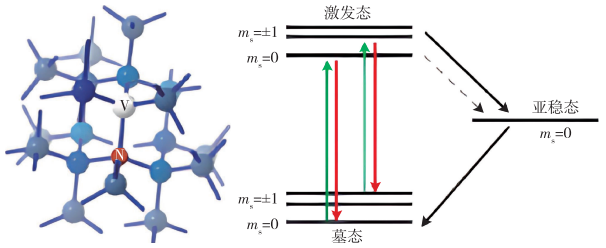
(1) 氮空位色心

NV 色心是指金刚石晶晶格中由氮原子（N）取代碳原子，并在相邻位置形成空位（V），形成的 N-V 复合缺陷。这种结构为自旋提供了一个类似于“真空冷冻室”的作用，强电（磁）偶极的同时，由于高自旋密度而通过光探测磁共振探测读出。该结构在室温下具有毫秒量级的电子自旋相干时间，使其能够实现纳米级空间分辨率的微弱磁场。

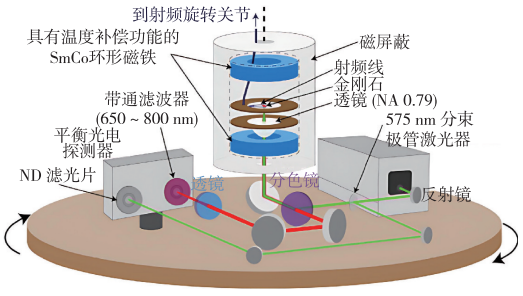
2014 年，Jensen 等实现的 NV 色心传感器达到

2.5 nT/$\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度[30]。2020年，Acosta团队将磁通聚集器与系综NV色心相结合发展了复合磁测量实验方法，灵敏度指标达到0.9 pT/$\sqrt{\text{Hz}}$，使NV色心磁测量低频灵敏度突破pT/$\sqrt{\text{Hz}}$水平[31]。2023年，Liu等通过采用纳米金刚石和磁性纳米粒子的混合结构进行传导和放大，从而使温度灵敏度达到创纪录的76 μK/$\sqrt{\text{Hz}}$[32]。2025年德国Trofimov等检测了单个氮空位中心的基本电荷，还测量了信号取决于氮空位NV的电子自旋状态，实现了非光学单自旋读出，为量子传感应用开辟了一条相干自旋动力学检测的道路[33]。

图6为氮空位色心的结构图，氮空位中心是金刚石晶体结构中存在氮原子，并且晶格中的氮原子相邻位置之一是空位。对应NV色心的电子能级结构：基态、亚稳态和激发态。通过激光激发可实现自旋态初始化与探测，磁场/转速变化会改变自旋能级分裂。图6(c)是NV色心实现的传感器装置示意图。该陀螺仪传感系统由NV色心传感单元、绿光二极管激光器、光电探测器以及光学元件构成，所有的构成元件都安装在一个直径为35 cm的旋转平台上。



(a) 色心结构 (b) NV中心的能级图



(c) NV原理的陀螺仪传感系统[34]

图6 NV色心

(2) IV族分裂空位色心

IV族分裂空位色心主要指将IV族的硅、锗、锡和铅引入金刚石后，通过固态膜与氮基气体(N_2，NF_3和NH_3)反应，生成硅空位(SiV)、锗空位(GeV)、锡空位(SnV)和铅空位(PbV)缺陷中心。这类色心具有反转对称性，对电场波动不敏感，零声子线(ZPL)比率显著高于NV色心。

2018年Nguyen等基于200 nm金刚石中的硅空位中心实现纳米级测温[35]。2024年美国华盛顿大学Han研究团队采用镓聚焦离子束注入氮化硅或二氧化硅薄层，在金刚石的近表面注入氮和硅原子，经高温退火和膜去除后，形成了NV和SiV色心[36]。2024年Guo等在金刚石光电探测器中引入硅空位色中心，提高了电动泵送效率[37]。

2.3.2 碳化硅色心

SiC作为第三代半导体材料，凭借其独特的物理性质在量子信息技术领域展现出巨大潜力。在结构上，SiC具有与金刚石相当的特异性质，带隙范围为2.4~3.2 eV，使其具备从紫外到中红外的宽谱透光能力，其晶格中天然拥有众多的色心体系[38]，主要包括硅空位色心、双空位色心和氮替位硅空位色心等。这类体系均具有较高的自旋相干时间，可以作为非线性光子器件的基底，也可以直接作为量子信息载体。

2023年，郭光灿团队在国际上首次实现基于碳化硅中硅空位色心的高压原位磁探测[39]。2024年宋清海等首次在室温条件下成功演示了SiC单电子-核自旋纠缠，并实现了其与绝缘层上碳化硅(SiCOI)波导集成[40]。这些传感应用已经显示出了SiCOI平台拓展量子光子学应用的巨大前景。

2.3.3 六方氮化硼色心

六方氮化硼(hBN)色心因其发射极中发现的高亮度和稳定性、可光学寻址的自旋态和宽波长覆盖范围，在近场传感和低维器件集成中具有独特优势，但其应用受到典型的随机缺陷分布和复杂的微观环境的阻碍。例如，hBN在转移过程中易产生皱纹和污染颗粒(良率仅2.68%[41])。2020年，Gottscholl等实现光学自旋初始态制备及读出，确定该中心在室温下表现出光学检测的磁共振，并证明了其在光泵浦下的自旋偏振[42]。2024年，Scholten等展示了单个hBN晶体中两种不同自旋物质之间的相互作用[43]。二维hBN已被广泛应用于展示基于二维材料的高性能器件，但其带隙和带阶决定了只有单层或多层hBN才能实现足够的静电控制。

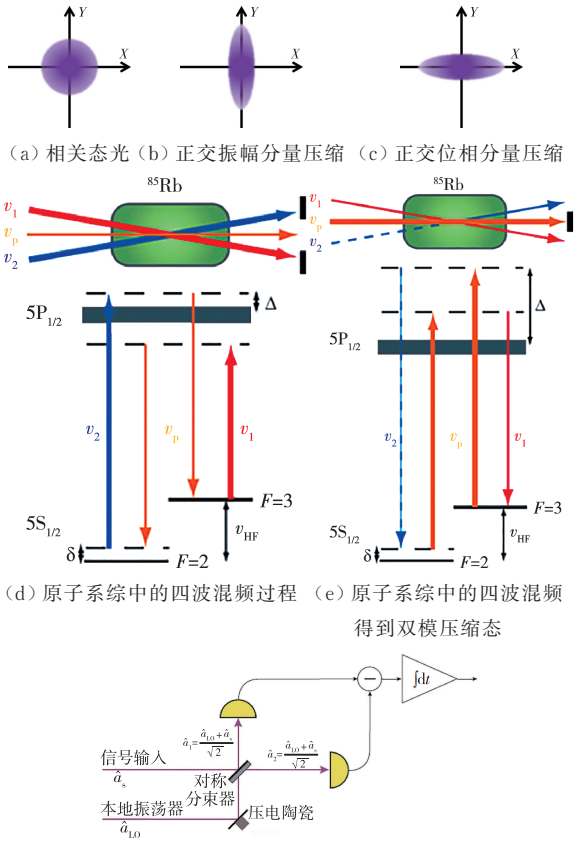
2.4 光量子

光学传感器一般是基于光压缩和光量子相关性两种控制方式。光压缩即产生相位或振幅波动

低于光场经典相干态的部分纠缠态，其理论早在自旋系综压缩[44-45]之前就已被 Caves 提出[46]，并由 Slusher 在 1985 年实现[47]。在引力波探测领域，压缩态光已显著提高探测器灵敏度。

LIGO Collaboration 在 2011 年实现的 GEO 引力波探测器中，利用压缩光将散粒噪声极限灵敏度提高了 3.5 dB；在 LIGO 引力波探测器的原理验证实验中，注入 10 dB 的压缩态光使干涉仪输出中的散粒噪声降低了大约 2.15 dB（28%），等效于在干涉仪臂腔中存储的能量增加了 60% 以上[48]。2024 年山西大学团队首次实现毫赫兹频段压缩态光场，量子噪声降低高达 8.0 dB，填补了低频引力波探测（如 LISA、天琴计划）的技术空白[49]。

如图 7 为压缩态光与压缩态产生及一种压缩态光场的探测原理图，展示了压缩态光与压缩态光场的产生及探测原理。图 7（a）展示了相关态光，这是光场中不同模式之间存在强相关性的一种状态，是产生压缩态光的基础。图 7（b）和（c）分别展示了正交振幅分量压缩和正交位相分量压缩。在正交振幅分量压缩中，光场的振幅分量被压缩，而位相分量的涨落增大；正交位相分量压缩则相反，位相分量被压缩，振幅分量的涨落增大。这些压缩态光在量子通信和精密测量中有重要应用。图 7（d）和（e）展示了原子系综中的四波混频过程。四波混频是一种非线性光学过程，通过泵浦光与原子系综的相互作用，产生信号光和闲置光。图 7（f）展示了平衡零拍探测的原理图。平衡零拍探测是一种用于探测压缩态光场的技术，通过将信号光与本振光进行干涉，然后用平衡探测器测量差拍信号，可以有效探测出光场的压缩特性。上述过程共同构成了压缩态光的产生和探测的完整链条，为量子光学和量子信息科学提供了重要工具。压缩光在长距离传输（如空间引力波探测）中因光子损耗导致其关联退化，从而其应用受到限制。此外，现有压缩光源最低频段为赫兹量级，未来需开发稳定的毫赫兹级光源以适应深空探测等方面需求。此外，量子光源与探测器集成在硅基芯片上可提升系统的紧凑性与稳定性，是未来光量子传感应用的重要方向。上述量子传感四大粒子技术各具独特优势与适用场景，总结如表 1 所示。



（a）相关态光（b）正交振幅分量压缩（c）正交位相分量压缩

（d）原子系综中的四波混频过程（e）原子系综中的四波混频得到双模压缩态

（f）平衡零拍探测的原理图

图 7　压缩态光与压缩态产生及一种压缩态光场探测原理图

表 1　不用传感方式的综合对比

传感方式	工作环境	系统复杂度	优点	缺点	典型应用
中性原子	超高真空＋低温	极高	具有良好的相干性和可控性，灵敏度高；原子蒸汽具有较高的信噪比和稳定性	系统复杂度极高，对环境条件（如温度、磁场等）较为敏感；需要复杂的激光系统和高精度的探测器	地质勘探、脑磁成像
囚禁离子	超高真空	高	离子的量子态可通过激光冷却和光学探测实现精确操控和读出；系统具有极低的环境噪声干扰	实验条件需要超高真空和复杂的电磁场控制；系统复杂且成本高昂，难以大规模集成；操作需要高精度的激光和微波系统	生物医学成像、材料检测、惯性导航、基础物理检验
色心粒子	室温	中	室温工作；系统结构紧凑，易于集成到小型化器件中	材料中的缺陷和杂质会影响传感器性能；相干时间通常短于囚禁离子和冷原子体系；需要高质量的晶体材料和精确的缺陷工程	工业无损检测、生物单细胞传感、纳米尺度的量子成像和光谱分析
光量子	室温	低（芯片级可实现）	压缩态光和纠缠光可突破经典测量极限；光量子系统具有高速、远距离传输能力	光子损耗和退相干效应会影响测量精度；实现高亮度、低噪声的压缩光源具有一定挑战；传输损耗与低频光源稳定性仍是瓶颈	自动驾驶、深空探测、医学影像

中性原子凭借亚 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$ 磁灵敏度与千秒级相干时间，适用于生物磁成像与重力测量，但面临激光冷却系统小型化挑战；囚禁离子以探测精度突破标准量子极限，成为基础物理检验利器，超高真空需求制约其工程化；色心粒子在室温下可实现纳米级磁场与温度传感，推动工业无损检测发展，亟待提升荧光收集效率与缺陷可控性；光量子通过压缩态噪声抑制及非经典成像穿透散射介质，开辟深空探测新途径，但传输损耗与低频光源稳定性仍是瓶颈。未来可以通过异构集成、多体纠缠增强及缺陷靶向调控协同突破。

3 量子传感材料

量子传感技术的发展将取决于材料的发展，量子传感的性能提升取决于器件的材料性能的提升，如光学和自旋相干性能提高、粒子物理性质的更均匀分布，以及实现可扩展性等。具体包括材料纯度提升、减少残余缺陷、靶向掺杂和同位素纯化、增强表面清晰度和优化材料边界界面等先进的材料处理技术，其他相关的技术还包括纳米级蚀刻、混合材料集成、与光学和电气行业标准连接器的牢固接口、与控制电子设备集成并封装到坚固耐用的设备中等。

3.1 硅基材料

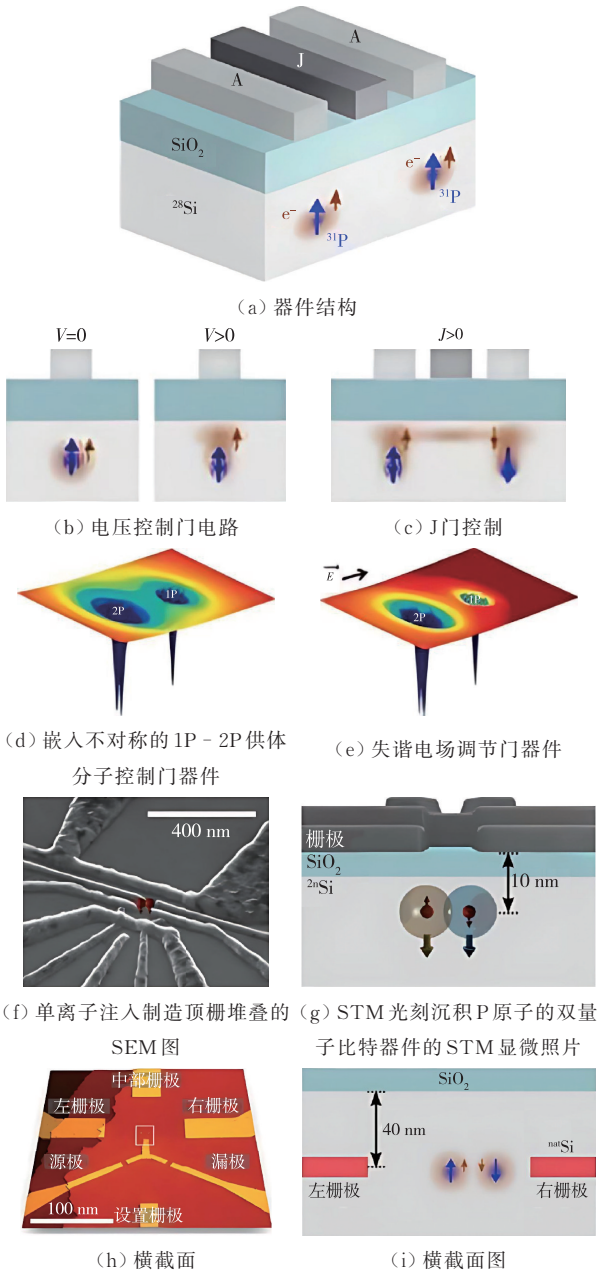
硅基材料占据半导体工业的核心地位。硅基材料中的自旋系统可以用于高灵敏度的量子传感，从而实现对微弱磁场和电场的检测。1998 年 Kane 首次提出基于磷（^{31}P）供体自旋的硅基量子计算方案，硅材料凭借其独特的量子特性迅速成为量子技术的重要载体[50]。图 8(a)为具体的基于磷供体自旋系统结构图，交换相互作用可以通过嵌入不对称的 1P - 2P 供体分子来进一步控制，以及通过应用失谐电场来调节。通过单离子注入制造或 STM 光刻沉积 P 原子均可实现双量子比特器件的结构，两种不同工艺形成的结构在尺寸上的区别如图 8(f)和(g)，功能层上的区别如图 8(h)和(i)。由于硅材料的晶体环境与自旋系统的弱耦合特性，硅基量子传感器具有较长的相干时间和高保真度的量子操作。

(1) 超长相干特性

在天然硅中，^{31}P 供体的电子自旋弛豫时间（T_1）可以达到 1 h，核自旋弛豫时间可以超过 10 h。这些长时间的弛豫时间表明，在天然硅中，^{31}P 供体的电子和核自旋能够保持其量子态的稳定性达数小时之久，这对于量子信息的长期存储和处理具有重要意义。^{28}Si 同位素具有零核自旋，不会与电子自旋发生超精细相互作用，从而显著降低了退相干效应，使得电子自旋的相干时间得以延长。在 ^{28}Si 同位素富集的环境中，电子自旋相干时间（T_2）可以延长至 10 s。

(2) 半导体真空特性

硅晶格中自旋-轨道耦合强度仅为 0.1 MeV 量级，比Ⅲ-Ⅴ族半导体低 2～3 个数量级，有效抑制退



(a) 器件结构　(b) 电压控制门电路　(c) J 门控制

(d) 嵌入不对称的 1P - 2P 供体分子控制门器件　(e) 失谐电场调节门器件

(f) 单离子注入制造顶栅堆叠的 SEM 图　(g) STM 光刻沉积 P 原子的双量子比特器件的 STM 显微照片

(h) 横截面　(i) 横截面图

图 8 基于磷供体自旋系统

相干；表面栅极硅MOS量子点中空穴自旋的T_2比电子自旋提升10～100倍，为高速量子操作提供新途径。

由于^{28}Si原子本身不具有自旋特性，通过低温冷却同位素纯化的^{28}Si层可充当“固态真空”，从而实现对自旋态的隔离。天然硅中含有4.7%的^{29}Si——这种具有核自旋的同位素会导致量子比特自旋态退相干。目前多数量子器件采用^{29}Si含量浓缩至800 ppm的量子级硅材料制成。^{28}Si生长方法有^{28}Si气相沉积[51]、^{28}Si聚焦束注入[52]和离子束沉积[53]等。

而使用表面层离子注入使^{28}Si富集，导致界面缺陷密度高达$1\times10^{10}\ cm^{-2}$，使器件内自旋相干时间比体材料缩短3个数量级。采用分子束外延（MBE）在超高真空条件下生长^{28}Si外延层，界面缺陷密度降低至$1\times10^{7}\ cm^{-2}$，电子自旋T_2提升至300 μs[54]。

未来硅基量子技术将聚焦在混合集成和缺陷控制方向：将供体量子比特与硅光子器件、超导微波谐振器集成，构建混合量子系统；通过应变工程调控供体局域电场，使核自旋操控速度提升至兆赫兹量级。

3.2　第三代半导体材料

第三代半导体材料主要指禁带宽度显著高于Si，GaAs的材料（$E_g>2$ eV）。其中常见代表性材料包括金刚石、SiC，GaN，hBN等，这些材料具有高击穿电场（大于3 MV/cm）、高热导率（金刚石：2 000 W/m·K）、高饱和电子速度（SiC：2×10^{7} cm/s）等特性，适用于大功率、高密度集成器件。

在量子传感应用中，由于宽禁带半导体中的色心缺陷具有自旋与光学性质，被广泛应用于高灵敏度量子传感领域，但其性能仍面临材料工程与器件集成等挑战。

3.3　铌酸锂材料

铌酸锂（Lithium Niobate，LN）被称为“光子学中的硅”，因具备一系列罕见的优点，特别适合用于电磁波频率信号的生成和操控，广泛应用于非线性光学、声学和电光过程，可以产生和操纵宽光谱范围内的电磁频率，进而实现敏感信号的感知。

铌酸锂材料凭借其优异的非线性光学、电光和压电特性，已成为现代光子器件和集成光学平台的核心材料。随着材料制备与加工工艺的持续进步，相关器件性能不断提升，支撑了众多高性能传感器与调制器件的实现。图9展示了铌酸锂技术发展的历程，涵盖了多个关键时间节点和技术突破。自1949年Matthias等首次合成铌酸锂多晶以来，该材料的研究和应用迅速推进。依次实现基于铌酸锂的扩散波导、钛电光调制器、质子交换波导技术等。进入2000年后，铌酸锂技术进一步发展，实现光学整流、dB/m级损耗、CMOS电压驱动的铌酸锂电光调制器、异质集成激光器及Pockels激光器等，标志着铌酸锂技术从低集成度向高集成度的技术演化趋势。另外，分析铌酸锂作为光子材料的发展历程，也可以将其分为三个主要场景：体材料、弱限制波导和强限制波导，如图9中右侧所示，分别用三个颜色加以区分，蓝色表示体材料，粉色表示弱限制波导，紫色表示强限制波导。

在器件方面，2018年，Lenzini等利用动态可重构的铌酸锂波导单片集成器件，制备和表征了压缩真空和双模纠缠态，对非经典量子态的产生、操纵进行了演示[55]。Zhang等利用两段PPLN波导作为非线性介质，设计并制备了单片二次非线性晶体，在扩展相位匹配条件下，通过该单片二次非线性晶体的级联SPDC过程对三重态谱进行了操纵[56]。2019年，哈佛大学的Loncar团队在LNOI上演示了克尔光学频率梳，且提出了一种宽光谱电光频率梳。这两种器件可以有效用于量子测量[57]。

在未来，铌酸锂晶体组件对于电磁频谱的全频段频率的产生十分重要，尤其是对于需要高光功率的应用，例如高功率光学参量振荡器，自由空间声光和电光调制器以及激光腔中的Q开关。其发展趋势首先是从毫米级芯片上的单元件过渡到微米级纳米光子电路，最终是复杂的多层网络。

3.4　二维材料

二维材料具有原子层厚度小、可修复缺陷和界面、传感信号较为敏感等特点，可作为一系列新兴量子技术的功能器件组件。其分类主要涵盖了单元素二维材料（Xenes）、过渡金属二硫化物（TMDCS）、金属氮化物/碳化物/碳氮化物（MXenes）、金属氧化物、金属磷化物、金属卤化物、混合氧化物等。由于掺杂比例、异质层和杂化物的区别，已成功应用于自旋电子和量子芯片。

以石墨烯、hBN和过渡金属二硫属化物（TMDs）为代表的二维量子材料，在原子层厚度下表现出显著量子限域效应。由于电子波函数在垂

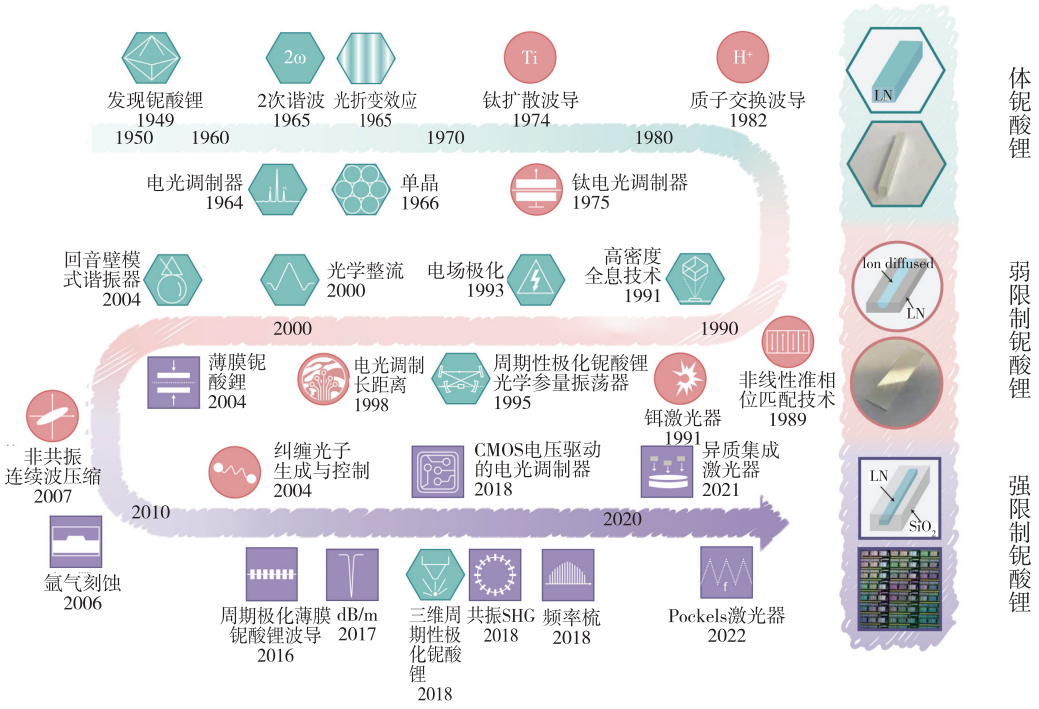


图 9 铌酸锂技术发展的时间线[58]

直方向受限,其能带结构重整化和强电子-电子相互作用[59]。二维材料和相关的范德华异质结构的各种性质也使其成为自旋电子学和未来量子技术中高度可调的量子材料。相比现有技术,二维材料在设备级层面性能优异,且易于与硅 CMOS 技术集成,是硅芯片的主要扩展功能的候选者。

石墨烯是最早发现的二维材料之一,具有弱自旋-轨道耦合和弱超精细相互作用,是构造自旋量子比特的理想材料。由于石墨烯是零带隙半金属,其束缚形成栅控量子点主要是利用反应离子刻蚀与局域氧化等技术实现。双层石墨烯可在垂直电场下打开可调能隙[60],利于通过电场实现量子点的束缚。二维材料不仅能够实现量子物质人工状态,还能实现固态量子计算,以此作为量子通信电路的关键部件以及设计实现量子传感的方案。

4 发展与挑战

量子传感利用量子态的叠加性、相干性和纠缠性等特性,在精密测量领域得到了广泛应用,并具有广阔的发展潜力。然而,量子传感器在实际应用仍面临如环境噪声抑制、材料缺陷控制、器件小型化与集成化等问题,未来研究需聚焦以下几个方向:(1) 开发新型量子材料,如二维材料和铌酸锂等;具体包括提高二维材料的缺陷控制水平,优化其掺杂技术和界面工程,以提升材料的量子传感性能;通过精确控制掺杂比例和异质层结构,开发具有更高自旋相干时间和灵敏度的二维量子传感器;此外,新型色心材料,如氮化镓和六方氮化硼中的色心缺陷因其独特的光学和自旋性质,有望在高灵敏度量子传感中发挥重要作用。(2) 优化芯片级集成技术,如冷原子系统真空封装、光路对准的微纳尺度适配性、离子阱电极的串扰抑制,以及铌酸锂波导与硅基电路的低损耗耦合实现量子传感器与经典电子器件的兼容。(3) 探索多体纠缠增强方案,突破标准量子极限,特别是多粒子纠缠保真度受环境退相干制约,压缩光在长距传输中的关联退化,里德堡原子对外场涨落的敏感性等技术。总之,量子传感将在高精度导航、人体极弱磁成像、深空探测等领域催生变革性应用,特别是通过进一步融合微纳加工、低温电子学与量子纠错技术,构建环境鲁棒性强、成本可控的工程化的应用。

参考文献:

[1] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P. Quantum sensing[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3): 035002.

[2] NSTC. Bringing quantum sensors to fruition[DB/OL], 2022 [2025-04].

[3] 王成杰. 基于金刚石氮-空位色心观测磁体中的演生粒子[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
Wang Chengjie. Observation of emergent particles in magnets

using nitrogen-vacancy color centers in diamond[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.

[4] 郭　弘，吴　腾，罗　斌. 量子传感(Ⅰ)：基础理论与方法[J]. 物理，2024，53(4)：227-236.
Guo Hong, Wu Teng, Luo Bin. Quantum sensing(Ⅰ): basics and approaches[J]. Physics, 2024, 53(4): 227-236.

[5] Bell W E, Bloom A L. Optical detection of magnetic resonance in alkali metal vapor[J]. Physical Review, 1957, 107(6): 1559-1565.

[6] Essen L, Parry J V L. An atomic standard of frequency and time interval: a Cæsium resonator[J]. Nature, 1955, 176(4476): 280-282.

[7] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.

[8] Kominis I K, Kornack T W, Allred J C, et al. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer[J]. Nature, 2003, 422(6932): 596-599.

[9] Saffman M, Walker T G, Mølmer K. Quantum information with Rydberg atoms[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(3): 2313-2363.

[10] Li X, Han B, Liu Z, et al. Femtotesla all-optical dual-axis spin-exchange relaxation-free magnetometer[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(25): 254102.

[11] Holloway C L, Prajapati N, Sherman J A, et al. Electromagnetically induced transparency based Rydberg-atom sensor for traceable voltage measurements[J]. AVS Quantum Science, 2022, 4(3): 034401.

[12] Holloway C L, Simons M T, Kautz M D, et al. A quantum-based power standard: using Rydberg atoms for a SI-traceable radio-frequency power measurement technique in rectangular waveguides[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(9): 094101.

[13] Perez M A, Nguyen U, Knappe S, et al. Rubidium vapor cellwith integrated nonmetallic multilayer reflectors[C]//2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2008: 790-793.

[14] Eklund E J, Shkel A M, Knappe S, et al. Glass-blown spherical microcells for chip-scale atomic devices[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 143(1): 175-180.

[15] Knappe S, Schwindt P, Shah V, et al. A chip-scale atomic clock based on 87Rb with improved frequency stability[J]. Optics Express, 2005, 13(4): 1249-1253.

[16] Raab E L, Prentiss M, Cable A, et al. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(23): 2631-2634.

[17] Lett P D, Watts R N, Westbrook C I, et al. Observation of atoms laser cooled below the Doppler limit[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(2): 169-172.

[18] Keith D W, Ekstrom C R, Turchette Q A, et al. An interferometer for atoms[J]. Physical Review Letters, 1991, 66(21): 2693-2696.

[19] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, et al. An atomic clock with 10^{-18} Instability[J]. Science, 2013, 341(6151): 1215-1218.

[20] Yang Y A, Luo W T, Zhang J L, et al. Minute-scale Schrödinger-cat state of spin-5/2 atoms[J]. Nature Photonics, 2025, 19(1): 89-94.

[21] 翟晨杰，王　晶，周俊杰，等. 基于量子重力仪的航空绝对重力测量[J]. 物理学报，2025，74(7)：38-46.
Zhai Chenjie, Wang Jing, Zhou Junjie, et al. Airborne absolute gravity measurements based on quantum gravimeter[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(7): 38-46.

[22] Baumgart I, Cai J M, Retzker A, et al. Ultrasensitive magnetometer using a single atom[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(24): 240801.

[23] Campbell W C, Hamilton P, Jansen P, et al. Rotation sensing with trapped ions: A Sagnac interferometer in a spin-space domain[J]. Physical Review A, 2017, 96(4): 042109.

[24] Gilmore K A, Affolter M, Lewis-Swan R J, et al. Quantum-enhanced sensing of displacements and electric fields with two-dimensional trapped-ion crystals[J]. Science, 2021, 373(6555): 673-678.

[25] Liu Y, Lu P, Rao X, et al. A single-atom mechano-optical transducer for sensing sub-attonewton vector DC force[J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(25): 254002.

[26] Wei Y F, Chao S J, Cui K F, et al. Improved measurement of the differential polarizability using co-trapped ions[J]. Physical Review Letters, 2024, 133(3): 033001.

[27] Rui Y, Zhang L, Li R, et al. Subrecoil cooling of 6Li atoms by 2S→3P ultraviolet narrow transition[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2023, 66(8): 280313.

[28] Zaitsev A M. Optical Properties of Diamond: A Data Handbook[M]. Berlin: Springer, 2001.

[29] Gruber A, Dräbenstedt A, Tietz C, et al. Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers[J]. Science, 1997, 276(5321): 2012-2014.

[30] Jensen K, Leefer N, Jarmola A, et al. Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(16): 160802.

[31] Fescenko I, Jarmola A, Savukov I, et al. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2): 023394.

[32] Liu G Q, Liu R B, Li Q. Nanothermometry with enhanced sensitivity and enlarged working range using diamond sensors[J]. Accounts of Chemical Research, 2023, 56(2): 95-105.

[33] Trofimov S, Lips K, Naydenov B. Voltage detected single spin dynamics in diamond at ambient conditions[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 3518.

[34] Jarmola A, Lourette S, Acosta V M, et al. Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope[J]. Science Advances, 2021, 7(43): eabl3840.

[35] Nguyen C T, Evans R E, Sipahigil A, et al. All-optical nanoscale thermometry with silicon-vacancy centers in diamond [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(20): 203102.

[36] Han Y, Pederson C, Matthews B E, et al. Creation of color centers in diamond by recoil implantation through dielectric films[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(4): 044007.

[37] Guo X, Yang B, Zhang X, et al. Diamond photo-electric detectors with introduced silicon-vacancy color centers [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2024, 12(38): 15483-15490.

[38] 章建帅, 张红军, 孙 辉. 量子相干调控金刚石锡空位色心光学双稳研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 159-166.
Zhang Jianshuai, Zhang Hongjun, Sun Hui. Controlling optical bistability through quantum coherence in tin-vacancy color centers in diamond [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 159-166.

[39] Wang J F, Liu L, Liu X D, et al. Magnetic detection under high pressures using designed silicon vacancy centres in silicon carbide[J]. Nature Materials, 2023, 22(4): 489-494.

[40] Hu H, Zhou Y, Yi A, et al. Room-temperature waveguide integrated quantum register in a semiconductor photonic platform[J]. Nature Communications, 2024, 15: 10256.

[41] Shen Y, Zheng W, Zhu K, et al. Variability and yield in h-BN-based memristive circuits: the role of each type of defect [J]. Advanced Materials, 2021, 33(41): 2103656.

[42] 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.

[43] Scholten S C, Singh P, Healey A J, et al. Multi-species optically addressable spin defects in a van der Waals material[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6727.

[44] Hald J, Sørensen J L, Schori C, et al. Spin squeezed atoms: a macroscopic entangled ensemble created by light [J]. Physical Review Letters, 1999, 83(7): 1319-1322.

[45] Wineland D J, Bollinger J J, Itano W M, et al. Spin squeezing and reduced quantum noise in spectroscopy [J]. Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1992, 46(11): R6797-R6800.

[46] Caves C M. Quantum-mechanical noise in an interferometer [J]. Physical Review D, 1981, 23(8): 1693-1708.

[47] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, et al. Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity [J]. Physical Review Letters, 1985, 55(22): 2409-2412.

[48] Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light[J]. Nature Photonics, 2013, 7(8): 613-619.

[49] Gao L, Zheng L A, Lu B, et al. Generation of squeezed vacuum state in the millihertz frequency band [J]. Light, Science & Applications, 2024, 13(1): 294.

[50] Kane B E. A silicon-based nuclear spin quantum computer[J]. Nature, 1998, 393(6681): 133-137.

[51] Becker P, Pohl H J, Riemann H, et al. Enrichment of silicon for a better kilogram[J]. Physica Status Solidi, 2010, 207(1): 49-66.

[52] Acharya R, Coke M, Adshead M, et al. Highly ^{28}Si enriched silicon by localised focused ion beam implantation [J]. Communications Materials, 2024, 5: 57.

[53] Dwyer K J, Pomeroy J M, Simons D S, et al. Enriching^{28}Si beyond 99.9998 % for semiconductor quantum computing [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(34): 345105.

[54] Becher C, Gao W, Kar S, et al. 2023 roadmap for materials for quantum technologies [J]. Materials for Quantum Technology, 2023, 3(1): 012501.

[55] Lenzini F, Janousek J, Thearle O, et al. Integrated photonic platform for quantum information with continuous variables [J]. Science Advances, 2018, 4(12): eaat9331.

[56] Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. Nature, 2019, 568(7752): 373-377.

[57] Wang C, Zhang M, Yu M, et al. Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation[J]. Nature Communications, 2019, 10: 978.

[58] Boes A, Chang L, Langrock C, et al. Lithium niobate photonics: unlocking the electromagnetic spectrum [J]. Science, 2023, 379(6627): eabj4396.

[59] 吴金蓉. 二维材料的表面原位制备和制备方法改进[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
Wu Jinrong. In-situ Preparation and Preparation Methods' Improvement of Two-Dimensional Materials [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[60] 井方铭. 双层石墨烯可调门控量子点中自旋轨道耦合劈裂的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
Jing Fangming. Study on spin-orbit coupling splitting in double-layer graphene tunable gated quantum dots [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.

作者简介:

张贤宇(1999—),男,江西省萍乡市人,硕士研究生,主要研究方向为微纳传感器、量子传感;

任青颖(1987—),女,博士,副教授,主要研究方向为微纳传感器器件的设计和加工,二维纳米材料传感器,量子传感器设计。