

量子传感 (II): 关键技术与典型代表

郭弘^{1,†} 吴腾¹ 罗斌² 刘院省³

(1 北京大学电子学院 量子信息技术中心 北京 100871)

(2 北京邮电大学电子工程学院 信息光子学与光通信全国重点实验室 北京 100876)

(3 北京航天控制仪器研究所 北京 100094)

Quantum sensing (II): technologies and typical examples

GUO Hong^{1,†} WU Teng¹ LUO Bin² LIU Yuan-Xing³

(1 Center for Quantum Information Technology, Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(3 Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China)

2024-05-18收到

† email: hongguo@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240604

摘要 作为量子信息感知物理实现基础的量子传感技术是三大核心量子技术之一,也是发展历史最悠久、技术成熟度最高、实际应用范围最广、潜在应用最多的量子技术。文章是量子传感综述论文的第二部分,在第一部分的基础上,介绍了量子传感的关键技术以及量子传感器的典型代表。其中,关键技术方面,结合量子态的制备、操控、探测,概括了量子传感具备颠覆性能力的核心原理及技术支撑;典型代表方面,详细介绍了频率、电、磁、重力、惯性等代表性量子传感器技术,以及各类量子传感器的基本原理、实现平台及发展现状。

关键词 量子传感器, 量子频标, 量子电磁传感器, 量子重力仪, 量子陀螺仪

Abstract Quantum sensing is one of the chief areas of current quantum technology, and has the longest history, the highest maturity, and the widest applications. This paper is the second part of “Quantum Sensing” review, and mainly focuses on the key technologies and typical examples of quantum sensors. The preparation, control and detection of quantum states, together with the core principles and technical basis of quantum sensing are summarized. Typical quantum sensor technologies such as those involving frequency standards, electric and magnetic field sensors, gravity and inertia sensors are introduced in detail, as well as the basic principles, development platforms, and current state-of-the-art.

Keywords quantum sensor, quantum frequency standard, quantum electro-magnetic sensor, quantum gravimeter, quantum gyroscope

1 引言

本文是量子传感系列综述的第二部分。量子传感的第一部分主要介绍了基本理论和方法^[1]：从理论上总结了量子传感的概念内涵，指出量子传感的核心是基于微观粒子状态(即量子态)的操控和读取，充分利用量子态的分立性、相干性、随机性，是量子传感区别于经典传感的根本，并从实际应用的角度，给出了量子传感的技术外延以及分类依据——量子传感涵盖但不仅限于量子传感器、量子精密测量、量子参数估计、量子计量等。不同的技术，其核心都是利用量子态与待测物理量之间的耦合作用，只是关注的侧重点有所区别，终将殊途同归；此外，第一部分综述还介绍了有关量子传感的基本架构，强调了量子传感可以用量子技术的通用框架进行描述，即，量子态制备、量子态演化、以及量子态读取，并总结了用于描述量子传感器性能的核心技术指标，如噪声、灵敏度、精度、量程、带宽等。以此为基础，本文作为量子传感系列综述的第二部分，主要结合量子态的制备、操控、探测，介绍使量子传感具备颠覆性传感能力的核心原理及关键技术支撑，以及目前代表性量子传感器的实现方法及发展现状。

2 量子传感关键技术

量子传感技术是伴随着量子理论、人们对微观粒子量子特性的发掘以及物理与信息技术的进

步而发展的。与经典传感技术相比，量子传感技术之所以能够具备颠覆性的传感能力，即低噪声(或高灵敏度、低不确定度)、高准确性(或高可重复性)，其核心原因是微观粒子状态具有的基本特性：分立性、相干性、随机性。如何充分兑现上述特性对传感带来的颠覆性效果，主要体现在针对微观粒子量子态的制备、操控、以及探测三个方面(图1)。

2.1 量子态制备

量子态制备主要包括“量子传感基本框架”中所涉及的“量子态初始化和初态制备”，主要目的是为了将微观粒子的状态转化为可用于传感的状态，该状态需要能够在待测物理量的作用下随时间演化。量子态制备是量子传感技术的基础。如何针对特定种类的微观粒子以及待测物理量，制备合适的量子态，并抑制影响量子态保持时间的物理因素，是量子态制备部分需要重点解决的两类问题及核心研究方向。

量子传感中的量子态制备方法按照微观粒子的类型，主要分为气态物质(主要包括原子、离子、分子等，其中原子最常见也最有代表性)、光子、固态物质(主要包括超导、金刚石NV色心、量子点等“人造原子”)三大类。其中，针对原子，主要对象是原子中的电子、原子核，表现为处于特定能级上的电子或原子核，主要通过光场、磁场、碰撞、非线性过程等方式进行状态制备^[2]；针对光子，主要对象是光子的偏振、相位等，表

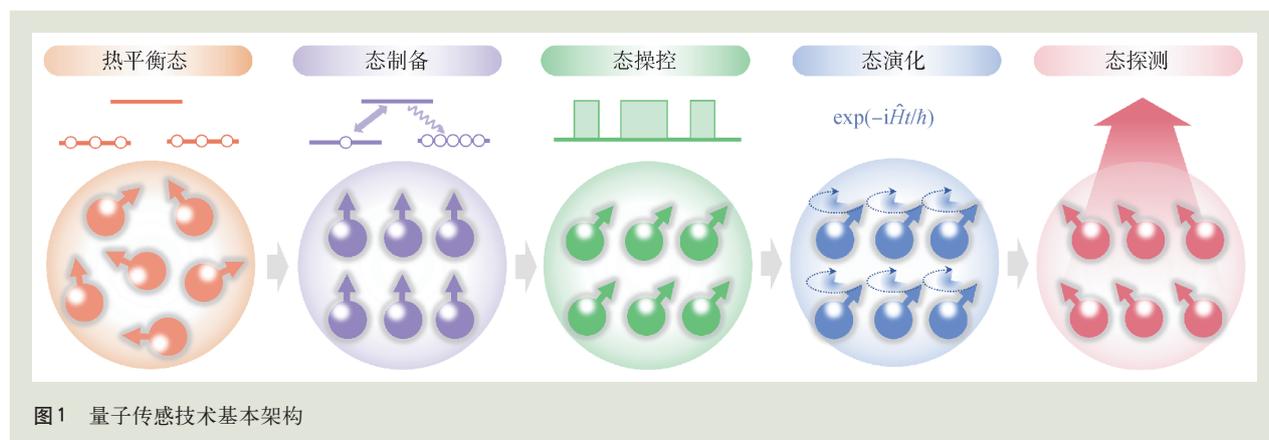


图1 量子传感技术基本架构

现为压缩态、纠缠态等特殊光场态，主要通过线性与非线性光学过程进行状态制备^[3]；针对超导，主要对象是超导量子比特^[4]，表现为量子化磁通、超导电流、电荷等，主要通过电场、磁场等方式进行状态制备。

除此之外，还有针对光力体系的量子态制备方法，主要对象是声子，表现为处于特定振动能级(状态)上的声子，可以通过光场等方式进行状态制备^[5]。鉴于声子数态及其相干叠加的制备在目前来看仍存在一定困难，本文也不做展开论述。值得一提的是，基于高品质微型谐振腔与光场耦合的光力系统，能够实现对多种物理量(如电场、磁场、力、加速度、转动等)的传感，潜力巨大^[6]。本文主要讨论针对原子的量子态制备方法。

(1)电子。束缚态原子核外的电子具有分立能级。分立性的本质归结于电子处在原子核的势场中(库仑势)，电子的波函数只能取特定模式。理论上，任意两个能级都具备构成量子传感的基本条件之一——二能级系统，原子核外的电子为构建用于量子传感的二能级系统提供了广阔的选择空间及优化渠道。

一方面，可针对待测物理量挑选合适的二能级系统。例如，对于原子钟，所选取的二能级系统应规避与外界物理量(如电场、磁场等)的相互作用，以精准提取、输出能级之间的本征频率；对于原子电(磁)传感器，则需要二能级系统具有显著的电(磁)偶极矩。

另一方面，需考虑针对该二能级系统的量子态制备是否具备技术可行性，主要取决于当前的技术手段。例如，在激光出现之前，对微观粒子状态的制备方法，主要基于微波场或静磁场，二能级系统的可选范围受限；20世纪90年代以来，半导体激光器技术飞速发展，使得二能级系统所对应的频率拓展到光频段。同时，激光的高度可控性，大大提升了状态制备效果，发展至今，已成为制备原子中电子状态的核心技术，即光泵浦(optical pumping)技术。

(2)原子核。与原子中的电子类似，原子核也具有分立能级，具备构建二能级系统的基本条件；然而，与电子不同之处在于，原子核的能量更高、

能级结构更复杂，且绝大多数能级之间的频率间隔都远大于电子的能级间隔以及可见光所对应的频率^[7]。由于制备原子核状态的基本条件是光频需匹配二能级之间的频率间隔，因此，目前利用激光来直接制备原子核的状态仍然非常困难。

鉴于上述原因，目前有关原子核状态的制备方法，主要集中于对原子核自旋的状态制备。绝大多数原子核的自旋量子数为 $1/2$ ，如 ^1H 、 ^3He 、 ^{13}C 、 ^{129}Xe 等，因此，自旋“朝上”(spin up)和自旋“朝下”(spin down)两个状态即可构成一个理想的二能级系统。在热平衡状态下，原子核自旋处于上述两个状态的几率几乎相同，原子核自旋的状态制备急需打破这种热平衡状态，目前主流的方法主要有以下几种。

(a)磁场。磁场与原子核自旋会产生相互作用，使得原子核自旋“朝上”和“朝下”两个状态的能量出现差异，且差异量正比于外磁场强度——外磁场越强，原子核在能量更低的状态上的分布几率就越大(玻尔兹曼分布)，相当于将更多的原子核制备到能量更低的状态上。这种状态制备方法被广泛应用于核磁共振等量子传感领域。

(b)交换碰撞。原子与原子之间发生碰撞时，一个原子中的电子与另一个原子中的原子核会因碰撞而在短时间之内耦合在一起。在这个过程中，电子的自旋状态，会通过电子—原子核之间的耦合作用，传递给原子核自旋，实现对原子核自旋状态的制备。自旋交换碰撞(spin-exchange collisions)可以发生在两种不同的原子体系之间^[8]，如碱金属原子(^{39}K 、 ^{87}Rb 、 ^{133}Cs 等)与惰性气体原子(^3He 、 ^{129}Xe 等)，也可以发生在同一种原子的不同状态之间，如 ^3He 的亚稳态和基态之间的自旋交换碰撞^[9]。这种原子核自旋状态的制备方法效率高，被广泛应用于基于惰性气体的量子传感领域。

(c)动态核极化。与交换碰撞类似，动态核自旋极化(dynamic nuclear spin polarization)也主要基于电子和原子核之间的耦合作用^[10]，该技术主要被应用于极化液态或固态样品中的原子核自旋。例如，可以利用金刚石氮原子—空穴色心中的电子来极化位于其附近的原子核(如 ^{15}N 、 ^{13}C 等)，在需要高空间分辨率的量子传感领域，如单个蛋白

质分子的信息提取等,有广泛应用^[11]。

值得一提的是,伴随着原子核能级的计算理论及技术方法的不断发展,原子核能级结构的信息也在不断扩充、完善,有助于发现可利用现有技术手段进行原子核状态制备的能级结构,即,对原子核直接进行光泵浦极化。截至目前,发现可以满足上述条件的元素是钷-229m(钷-229的核异构体,为钷-229核的激发态,钷-229是钷的放射性同位素之一),对应的激光波长在150 nm附近^[12]。相较于核外电子,原子核受外界电磁场影响更小,因此,利用钷-229m构建基于原子核的光学原子钟是目前量子传感领域的重要研究方向^[13],理论上要比基于核外电子的光学原子钟具备更优异的长期稳定性能。

以上简略归纳了目前在量子传感领域,用于制备原子状态的几类技术方法。相较于原子核,电子的状态制备主要基于光学手段,归根结底,还是归功于半导体激光器及非线性光学晶体(尤其是倍频晶体等非线性光学参量过程所涉及的非线性光学晶体)技术的不断发展,为电子状态的制备提供了充足的光源。以上技术主要集中于将原子由热平衡状态转变为非平衡状态,核心目的是将尽可能多的原子制备到同一个状态,一般也被称作状态极化(state polarization)。对于量子传感而言,更高的极化度意味着更高的信号强度,以及更高的传感性能指标,因此在保证足够的原子数的前提下,不断地提高原子的极化度,是量子传感技术领域孜孜以求的目标。除了将尽可能多的原子制备到相同状态,还可以制备如原子压缩态、纠缠态等特殊的量子态,这类研究目前仍主要局限于少量原子数所构成的体系,但其发展潜力与意义十分重大。

针对量子传感应用,除了需要不断发展状态制备技术、提高状态极化度、制备更大粒子数尺度下的特殊量子态之外,还需关注如何减小对微观粒子状态的影响。例如,影响原子状态保持时间的一个主要因素就是碰撞——原子与原子之间的碰撞,以及原子与边界的碰撞,对基于气态原子的量子传感技术的性能影响尤为显著。原子与

原子之间的碰撞,会严重影响电子状态,可通过在原子周围充入缓冲气体原子等方法来抑制;与边界的碰撞,如处于玻璃气室中的原子,可以通过对器壁镀膜(如石蜡膜、氢化铷等)的方法进行抑制^[14, 15]。对于固态“人造原子”体系,如NV色心,影响原子状态保持时间的主要因素是体系中的杂质,杂质会产生随机的电磁扰动,进而影响电子、原子核的状态,可通过对材料进行提纯来抑制。这些抑制方法虽主要涉及工程技术,但却是保障量子传感技术性能指标的关键,甚至是决定性因素。

2.2 量子态操控

量子态操控主要包括“量子传感基本框架”中所涉及的“量子态的演化和转化”,对于量子传感而言,这一部分相较于量子模拟/量子计算,有所不同:“量子计算需要将待解决的问题或拟实现的算法,转化(或编译)为一系列实现量子态演化的相互作用哈密顿量;而对于量子传感,在态的演化部分,一般需要考虑量子态在待测物理量作用下的演化形式”^[1, 2]。目前成熟度最高的一类量子传感技术,如原子钟、原子磁力仪、原子重力仪等,其量子态操控部分的基本目的可以概括为以下两点:

(1)将制备的量子态转化为可在待测物理量(如频率、磁场、电场、转动等)作用下演化的状态,例如,对于原子钟,需将原子状态转化为能够在原子内禀作用下演化的状态,该状态演化中就包含了可用作原子钟频率的信息(如不同量子态之间的相位差);对于原子磁力仪、原子重力仪等,亦是如此;

(2)将演化后的量子态转化为可观测的状态,这一步主要取决于后面的观测手段。如果选择的观测手段可以直接观测演化后的叠加态,则无需进行这一操作。

对于原子中的电子以及原子核而言,基本的量子态操控手段仍集中于激光、交变或静电磁场。针对一些特殊的应用需求,也会设计一些特定的

量子态操控方式,典型的有动态解耦序列,其在于基于固体(如NV色心)的量子传感技术中有广泛应用:一方面,可以抑制环境噪声对量子态演化的不利影响,等价于一个可以滤除部分环境噪声的“滤波器”;另一方面,也为探测按照一定频率演化的物理量提供了技术手段(交流信号探测)。常用的动态解耦协议包括Carr-Purcell和Carr-Purcell-Meiboom-Gill(简称CPMG)方案^[2]。

可以看到,一切量子态操控技术的基础,仍是微观粒子的分立性,以及基于此而形成的二能级系统——能级之间固定的频率间隔为操控原子状态打开了大门。随着量子传感器不断被应用于更实际的应用场景,如何充分发挥量子传感器在复杂环境下的应用性能,实际上对量子态的操控已经提出了新的要求。

2.3 量子态探测

量子态探测主要包括“量子传感基本框架”中所涉及的“量子态的读取”,这一部分主要对演化后的量子态进行测量,并提取有关待测物理量的信息。根据“量子传感(I)”中的介绍,相较于初态而言,演化后的状态一般是原本征态的叠加态,因此,单次测量得到的结果是随机的。读数是一个伯努利过程,以 $1-p$ 的概率得到状态A,以 p 的概率得到状态B,这个概率通过单次测量无法得到,需进行多次测量。这里的重复有两方面意思,一方面,体现为对单个粒子重复进行态的制备、演化、探测;另一方面,体现为粒子系综的探测结果均值,这两种意义上的重复可以并列进行。

对于原子中的电子,类似于状态制备,目前最有效的探测手段,仍是基于对光场参数的探测,如光场的强度、偏振等。电子在两个能级之间的状态演化,会通过这两个能级所形成的电多极矩,如电偶极矩、电四极矩等,直接影响光场参数。通过测量经过原子系综后光场的强度、偏振(主要通过测量偏振旋转角度,如非线性法拉第旋光效应),或者测量荧光强度,都可以直接提取电子的

状态信息。目前,偏振旋转测量的主要方法是平衡探测,或差分探测。相较于强度探测,平衡探测可在一定的程度上抑制激光强度中的共模噪声(主要是技术类噪声);此外,平衡探测提供了与特殊光场态(如压缩态)相结合的契机,能够进一步压制探测结果中的量子噪声。

对于原子中的原子核,由于缺乏能够直接耦合原子核能级的光学手段,针对原子核状态的探测技术,主要包括两大类:第一类主要通过电子与原子核之间的耦合作用,通过测量电子的状态来间接反映原子核的状态,如Rb—Xe混合系统,利用极化的Rb原子极化Xe原子核,同时,利用Rb原子探测Xe原子核的状态演化,其中会涉及对原子核自旋所产生的磁场信号的放大效应^[6];第二类主要针对原子核的自旋状态,即,随时间演化的自旋状态会产生随时间变化的磁矩,进而产生随时间变化的磁场,可通过外置感应线圈(利用法拉第电磁感应定律),或外置磁传感器(如原子磁力仪),来探测变化的磁场,进而实现对原子核状态的探测^[7]。此外,选择特定的量子态探测方式,如量子无损测量、弱测量等,可以制备特殊的量子态,如原子的自旋压缩态、纠缠态等,也是目前有关量子传感领域的重点研究方向之一。

以上主要针对原子中的电子、原子核,从量子态的制备、操控、以及探测三个方面,总结了量子传感的基本特点。上述讨论对基于光子、超导等体系的量子传感技术,也基本适用(受限于篇幅,相关综述见文献[2])。量子传感的核心是对微观粒子量子态的精确操控和读取,其本质是人类对微观世界的操控能力以及认知水平的综合体现。相信随着科技水平的不断发展,基础理论以及计算方法的不断深入,量子传感技术也一定会迎来更为广阔的发展空间。

3 量子传感器典型代表

这部分主要介绍目前典型的量子传感器。结合“量子传感(I)”中的介绍以及有关量子传感器的定义,已进入实用化阶段的量子传感器的典型

代表为原子钟、原子磁力仪、原子干涉重力仪等。同时，以金刚石NV色心、里德伯原子等为平台的传感技术，因其独特的优势也正在逐步成为重要的发展方向，受到了广泛关注。

3.1 原子钟及时频技术

原子钟的物理基础是量子频率标准(简称为量子频标)，它采用量子体系中能级之间的共振跃迁频率作为参考，共振频率信号非常稳定且不易受外界环境影响，因此可提供目前为止最高精度的频率信号。

量子频标按波长可分为微波频标(对应微波原子/离子钟，常简称为微波钟)、光频标(光频原子/离子钟，常简称为光钟)(图2)。由于光波频率比微波频率大至少6个量级，光频标的频率相对不确定度水平要优于微波频标。虽然微波钟发展成熟且应用广泛(常用的微波钟有H、Rb、Cs三种)，且迄今为止国际秒定义标准仍采用Cs原子钟，然而，微波钟由于原理上的固有限制，其性能指标很难在现有水平上得到更大的提升。随着光钟技术的迅速发展，光钟指标已达 10^{-19} 水平，远超微波钟，且有望得到进一步提升，尤其是近几年有关核光钟的理论及技术突破(前文所述钍-229 m)，更是为打开 10^{-20} 频率不确定度的大门提供了重要契机^[18]。

另一方面，以时频同步技术为核心的大范围、远距离时频传递网络技术也在迅速发展^[19]，该技术可将原子钟提供的高精度时间频率信号传递到远端并实现共享。多种高性能原子钟结合高精度、远距离、网络化的时频传递技术，利用广泛布设的地面基站，在接收不到导航卫星信号或信号不足的情况下，能够继续提供高精度导航定位信号服务^[20]。

3.2 原子磁力仪

原子磁力仪(或原子磁传感器)主要利用原子中的固有磁矩(或称内禀磁矩)在磁场下的演化规律，实现对外磁场幅值以及方向的测量。

目前常用的原子磁力仪，按照原子系综的种类可分为碱金属原子^[21]、He原子(包括³He^[22]、⁴He^[23, 24])、金刚石NV色心^[25]等。其中，碱金属原子磁力仪利用基态电子磁矩，兼具较高的相互作用原子数密度以及较长的自旋弛豫时间，磁场探测极限灵敏度单项指标最优。⁴He原子的核自旋量子数为0，因此基态能级无内禀磁矩，需采用射频激励将基态原子激发到亚稳态。在原子数密度与自旋弛豫时间两方面，不及碱金属原子，然而核自旋为0的优势在于亚稳态⁴He原子的能量变化与外磁场呈线性关系，不存在外磁场对碱金属原子所产生的非线性塞曼效应。相较于碱金属原子

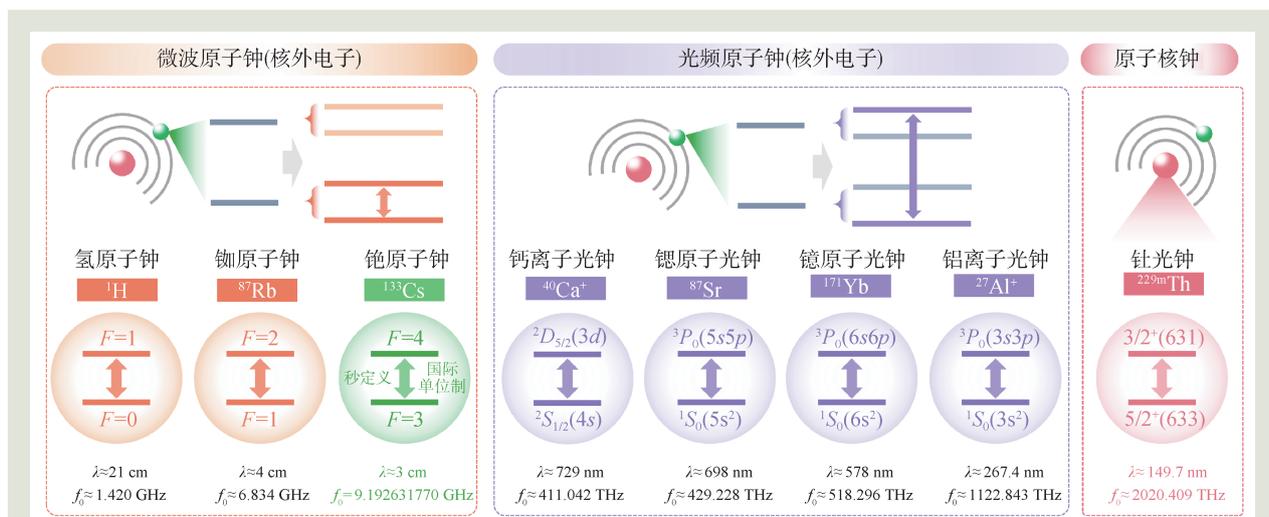


图2 量子频标技术分类及基本信息——微波原子钟、光频原子钟及原子核钟

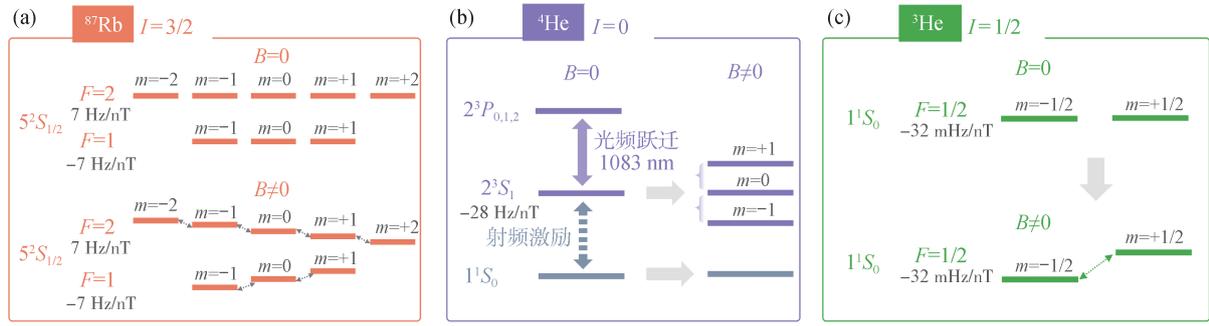


图3 原子磁力仪典型代表及相应的用于磁场测量的能级结构信息。(a) 铷原子 ^{87}Rb ；(b) 氦-4原子 ^4He ；(c) 氦-3原子 ^3He 。其中 I 为核自旋量子数

磁力仪， ^4He 原子磁力仪在运动平台下更有优势。与 ^4He 不同， ^3He 原子磁力仪利用的是其原子核磁矩(测量原子核自旋)，自旋弛豫时间长，纵向弛豫时间能够达百小时(图3)^[26]。

提升原子磁力仪探测性能的技术方法，主要涉及两个方面：提高相互作用的原子数、提高原子自旋的弛豫时间^[27]。前者可以通过增加气室温度(碱金属原子)、增加激励功率(He原子)、以及增加激光与原子相互作用的光程(增加原子气室的尺寸、设计多反射光路结构^[28, 29]等)来实现；后者主要通过填充缓冲气体、对原子气室器壁进行镀膜^[30, 31]，以及快速碰撞达到抑制自旋交换弛豫^[32]等方式来实现。不同的技术方案各有优缺点及限制因素。

发展至今，原子磁力仪的探测灵敏度已达到甚至超越 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 的水平，逼近甚至超越超导干涉磁力仪(SQUID)，且有许多应用上的巨大便利。相较于SQUID，原子磁力仪最大的优势在于无需低温制冷及便携性，目前正在集成度、鲁棒性、环境适应性等方面快速进步。随着原子磁力仪综合性能的不断发 展，其在基础物理、地磁观测、地质勘探、生命科学与医学等领域均正在或将要得到越来越广泛甚至是不可替代的应用。我们将另文详述这些重要应用方向。

3.3 原子干涉重力仪

为了测量自由落体加速度绝对值，一般采用测量自由落体运动轨迹来解算重力值，称为弹道

式绝对重力仪^[33]。经典绝对重力仪一般利用激光干涉仪测量安装有反射镜的宏观落体的下落距离(图4(a))。宏观落体可以被冷原子团所替代，激光干涉仪也可以更换为基于原子束的原子干涉仪，这就形成了原子干涉重力仪^[34]。

原子干涉重力仪利用的是原子物质波的干涉(图4(b))。相较于光波，物质波波长更短，因此具备准确度高、稳定度好、测量速度快、无机械磨损等特点，是绝对重力测量非常有潜力的技术方案和发展方向之一。发展至今，原子干涉重力仪的标准不确定度已逼近激光干涉绝对重力仪，达到微伽水平(伽为重力加速度单位，写作Gal，在自然单位制下， $1\text{Gal}=0.01\text{m/s}^2$)。随着激光波前畸变效应评估水平的提高，不确定度有望降至亚微伽。除了进行绝对重力测量之外，还可以实现基于原子干涉效应的原子干涉重力梯度仪以及全张量原子干涉重力梯度仪。

3.4 金刚石NV色心及固态掺杂体系

通过固态材料掺杂可以使固体材料的电子态和电子能级具备和原子的核外电子类似的分立能级结构，因此可以作为对气态原子体系很好的模拟或替代。固态材料掺杂体系中，最重要的一类是金刚石NV色心——金刚石中一个C原子被N原子取代，同时邻近的一个C原子缺失所形成的晶体缺陷，称为N原子—空位缺陷色心，即nitrogen vacancy center (NV色心)。其电子结构可等效

为 $S=1$ 的电子自旋三态和 $S=0$ 的电子自旋单态(S 指自旋量子数)(图 5(a), (b))。NV 色心可以实现更精确的空间位置控制——高空间分辨率是金刚石 NV 色心等固态掺杂体系的核心优势。

基于 NV 色心的量子传感器主要被应用于测量磁场, 其磁场探测灵敏度主要受限于荧光收集效率以及自旋弛豫时间。前者可以通过设计特定形式的波导^[35], 或采用光吸收以及光学谐振腔的方式进行优化^[36]; 对于后者, 因为是固体, 相互作用的原子数密度很大, 相应地, 原子自旋弛豫主要受限于原子之间的相互作用, 因此需要在掺杂浓度和自旋弛豫时间之间权衡。目前, NV 色心磁传感器(系综)的探测灵敏度可达到亚 $\text{pT/Hz}^{1/2}$ 的水平^[37]。除了测量磁场之外, NV 色心还被广泛应用于测量电压、压强、温度、酸碱度等, 其核心都是利用上述物理参数对 NV 色心能级结构的影响。此外, 在极端环境(如高压)下, NV 色心也具备一定的传感优势。

单 NV 色心在纳米尺度的传感方面一直占据着重要地位^[38], 比如高分辨率的扫描探测技术^[39]、作为活体器官内的生物标记物^[40]、单蛋白质成像^[41]等(图 5(c))。对于生命科学领域, NV 色心具备发展形成新型探测设备的巨大潜力, 例如, 可将 NV 色心集成在光纤中, 通过光纤, 既方便用于极化 NV 色心中的电子自旋, 也易于收集用作磁场传感的荧光信号^[42]。

除了 NV 色心之外, 近年来, 基于硅色心(silicon color center)、

量子点(quantum dot)等其他类型的固态掺杂体系“人造原子”的研究也越来越多^[43], 不过这些技术在实用性、技术成熟度, 以及研究的广泛程度等方面, 与 NV 色心仍有一定距离。

3.5 里德伯原子电场探测

里德伯原子是指主量子数远大于 1 的原子, 其最外层束缚电子离原子核很远, 对于电场测量极具优势。首先, 里德伯原子具有巨大的电偶极矩——电场改变原子能量, 电极矩是重要媒介; 其次, 里德伯态的能级跃迁频率可覆盖 MHz—THz 的超宽范围(图 6); 第三, 里德伯原子具有更长的辐射寿命, 可获得更长的相干测量积分时间, 有利于获得更高的相干测量灵敏度。借助于激光频率精确锁定、大范围可调谐等技术的快速

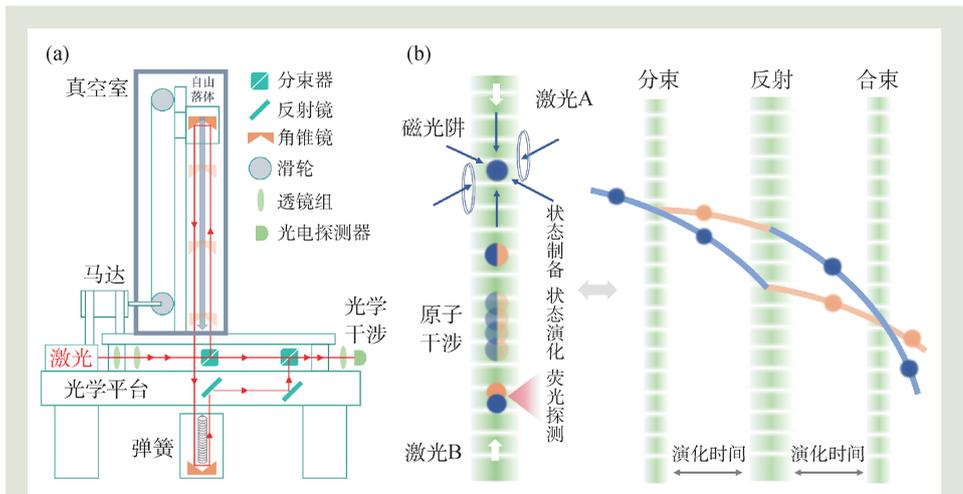


图 4 (a) 光学干涉重力仪基本结构; (b) 原子干涉重力仪基本架构及工作原理示意图

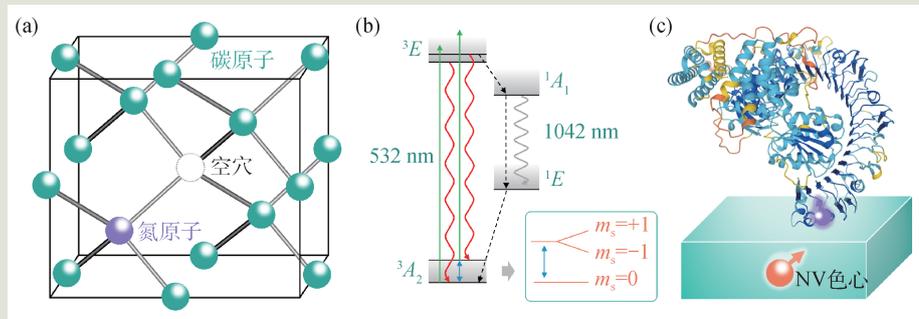


图 5 (a) NV 色心结构图, 其中绿色小球表示碳原子, 紫色小球表示氮原子, 白色小球表示空穴, 氮原子和空穴构成了 NV 色心的基本结构; (b) NV 色心能级结构图, 其中, 3A_2 和 3E 分别表示基态三重态和激发态三重态, 1A_1 和 1E 表示中间态; (c) 基于单个 NV 色心的蛋白质分子成像技术

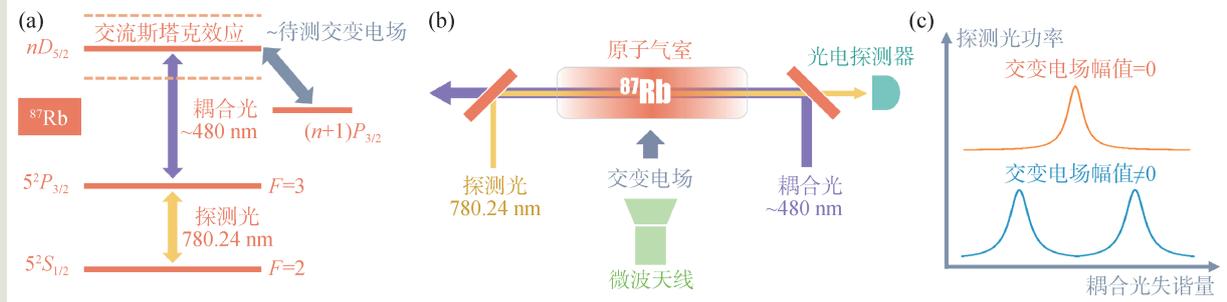


图6 (a) 里德伯原子基本能级结构, 探测光和耦合光用于产生EIT(电磁感生透明)效应; (b) 基于里德伯原子的交变电场测量基本架构; (c) 探测光功率随耦合光失谐量的变化。若不存在交变电场, 只有一个峰; 若存在交变电场, 则存在两个峰, 且两个峰之间的频率间隔正比于交变电场的幅值

发展, 利用单光子或多光子激发方式可实现里德伯量子态的精确制备, 以及对里德伯量子态的光读出。

相较于基于传统天线的电场探测方式, 基于里德伯原子的电场探测可以很好地解决传统电场探测系统存在的计量溯源性问题——类似于原子磁力仪, 对于里德伯原子, 电场与频率之间具有固定的比例关系, 可实现自校准而无需外界参考^[44]。同时, 基于里德伯原子的电场探测灵敏度理论极限仅受限于量子投影噪声, 优于受限于电路噪声的传统电场探测系统。此外, 里德伯原子电场计可在同一套系统内通过改变激光波长实现MHz—THz频率的宽覆盖范围, 而传统天线需针对不同频段的电场信号, 改换不同特征尺寸的天线, 才能匹配相应的特征波长。

3.6 量子惯性技术

量子惯性技术主要包括原子陀螺仪和原子加速度计, 前者主要包括原子干涉陀螺仪、核磁共振陀螺仪和无自旋交换弛豫陀螺仪, 后者主要为原子干涉加速度计。

原子干涉陀螺仪利用原子物质波的Sagnac干涉效应实现对转动的传感^[45], 目前的主要技术方案包括双冷原子团对抛干涉、冷原子束流对射干涉、热束流对射干涉等, 实验室样机的零偏稳定性达到 10^{-5} °/h量级(h为小时, 下同), 但距离理论精度仍有很大差距。

核磁共振陀螺仪以碱金属原子和惰性气体原子为工作介质, 通过内嵌碱金属原子磁力仪, 探测原子核自旋磁矩的进动信号, 实现载体转动信息的传感^[46], 兼具导航级精度和小体积等优势。其零偏稳定性能够达到 10^{-2} °/h量级。目前, 核磁共振陀螺仪发展面临的严峻挑战是: 如何采用批量生成工艺, 如微机电加工工艺(MEMS), 实现核心部件的大批量制造和组装。

无自旋交换弛豫(spin exchange relaxation free, SERF)陀螺仪需工作在原子数高密度和零磁条件, 也能够实现对转动信息的高灵敏传感^[47]。目前, SERF陀螺仪的零偏稳定性处于 10^{-2} — 10^{-3} °/h水平。其面临的巨大困难是如何提升测量范围和陀螺输出闭环机制的难题。

原子干涉加速度计采用激光相位标记原子位置的方法实现载体加速度的精密测量, 具有灵敏度高、长期稳定性好以及扩展性强等技术优势^[48]。与原子干涉陀螺仪略有不同的是——原子干涉加速度计对原子是否在空间上发生角度的偏转无硬性要求, 即无需构成Sagnac干涉环, 原子可在同一路径上飞行并实现加速度的精密测量。目前, 原子干涉加速度计主要包括自由空间型和光纤导引型, 前者需要重点解决重力解耦难题, 后者需要重点解决光子晶体光纤中原子装载数量和相干时间提升等难题。

NV色心陀螺仪和光动量加速度计也属于量子惯性技术范畴, 在空间分辨率、集成度等方面具有优势, 但尚处于技术探索阶段^[49, 50]。此外,

超导干涉仪、量子增强光学干涉仪、量子照明、量子成像、光力等也属于量子传感技术，限于篇幅，在这里没有详述。其中，超导量子干涉仪早已是成熟技术且已迈入实用，其应用主要受限于对低温制冷的需求；纠缠/压缩光注入的光学干涉仪可以提高仪表性能至标准量子极限以下，但受限于光源亮度和成本问题，目前尚未显示出强的推广应用价值(引力波探测除外)；量子照明也面临类似的光源问题。

量子成像和光力技术可以认为是量子技术启发的技术。量子成像/量子关联成像早期的学术研究起源于纠缠光源，但主流实际应用研究中并未使用纠缠光源，而是在很大程度上与当前蓬勃发展的计算成像技术高度融合。而光力早在20世纪60年代就由A. Ashkin (2018年诺贝尔物理学奖得主)提出，并产生了光镊(1986年实现)和光学黏团(1997年诺贝尔物理学奖)。近十年，光力系统由于可将宏观(介观)物体冷却到量子基态而受到高度重视，迄今为止，在力学相关的精密测量领域取得了很好的进展，同时，光力系统也具备对多种物理量(如电场、磁场、力、加速度、转动等)的传感能力，应用潜力巨大。

参考文献

- [1] 郭弘, 吴腾, 罗斌. 物理, 2024, 53: 227
- [2] Degen C, Reinhard F, Cappellaro P. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89: 035002
- [3] Raimond J M, Brune M, Haroche S. *Reviews of Modern Physics*, 2001, 73: 565
- [4] Krantz P, Kjaergaard M, Yan F *et al.* *Applied Physics Reviews*, 2019, 6: 021318
- [5] Aspelmeyer M, Kippenberg T J, Marquardt F. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86: 1391
- [6] Hu Y W, Xiao Y F, Liu Y C *et al.* *Frontiers of Physics*, 2013, 8: 475
- [7] Index to Nuclear Science Wallchart. <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/outline.html>
- [8] Appelt S, Amar Baranga A B, Erickson C J *et al.* *Physical Review A*, 1998, 58: 1412
- [9] Gentile T R, Nacher P J, Saam B *et al.* *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89: 045004
- [10] Barker W A. *Reviews of Modern Physics*, 1962, 34: 173
- [11] Shi F Z, Zhang Q, Wang P F *et al.* *Science*, 2015, 347: 1135
- [12] Safronova M S, Porsev S G, Kozlov M G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*,

4 结语

本文介绍了量子传感的关键技术以及量子传感器的典型代表。以原子中的电子、原子核为代表，从量子态的制备、操控、探测三个方面，概述了量子传感与经典传感的区别，指出了量子传感相较于经典传感具有颠覆性传感能力的物理本质，进而总结了量子传感潜在的发展方向。另外，从实际应用角度出发，详细介绍了目前已进入实用化阶段的量子传感器的典型代表，覆盖频率、电、磁、惯性、重力等物理量的测量。总体而言，上述量子传感技术的核心仍是基于微观粒子的分立性，其发展方向主要体现在如何进一步提升量子传感器的环境适应能力，以及与“二次量子革命”以来的量子精密测量技术进行结合。依托经典噪声抑制技术及信号提取技术，经过数十年的发展，此类量子传感器已经充分证明了其优异的传感性能。更进一步，需要提高此类技术在更实际、更复杂应用场景下的传感性能，以期进一步拓展量子传感所带来的极限探测性能的潜在应用方向。我们将另文详述量子传感技术在当前的核心应用场景及进一步发展的方向。

- 2018, 121: 213001
- [13] Safronova M S. *Nature Physics*, 2018, 14: 198
- [14] Balabas M V, Jensen K, Wasilewski W *et al.* *Optics Express*, 2010, 18: 5825
- [15] Seltzer S J, Romalis M V. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 114905
- [16] Su H W, Jiang M, Peng X H. *Science China Information Sciences*, 2022, 65: 200501
- [17] Koch H C, Bison G, Grujić Z D *et al.* *The European Physical Journal D*, 2015, 69: 202
- [18] Thielking J, Okhapkin M V, Glowacki P *et al.* *Nature*, 2018, 556: 321
- [19] Riehle F. *Nature Photonics*, 2017, 11: 25
- [20] Jade M Y *et al.* *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. John Wiley & Sons, 2021. p.1
- [21] Jeffrey S S. *Developments in Alkali-metal Atomic Magnetometry*. Princeton University, 2008 (THESIS)
- [22] Farooq M, Chupp T, Grange J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2020, 124: 223001

- [23] Gilles H, Hamel J, Cheron B. Review of Scientific Instruments, 2001, 72: 2253
- [24] Wu T, Peng X, Lin Z *et al.* Review of Scientific Instruments, 2015, 86: 103105
- [25] Doherty M W, Manson N B, Delaney P *et al.* Physics Reports, 2013, 528: 1
- [26] Urghoff M, Gemmel C, Heil W *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2011, 295: 012017
- [27] Budker D, Kozlov M G. Optical Memory and Neural Networks, 2024, 32: S409
- [28] Sheng D, Li S, Dural N *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 160802
- [29] Liu Y, Peng X, Wang H *et al.* Optics Letters, 2022, 47: 5252
- [30] Balabas M V, Karaulanov T, Ledbetter M P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 105: 070801
- [31] Li W, Balabas M, Peng X *et al.* Journal of Applied Physics, 2017, 121: 063104
- [32] Allred J, Lyman R N, Kornack T W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 89: 130801
- [33] Crossley D, Hinderer J, Ricciardi U. Reports on Progress in Physics, 2013, 76: 046101
- [34] Poli N, Wang F, Tarallo M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 038501
- [35] Momenzadeh S A, Stohr R J, Oliveira D *et al.* Nano Letters, 2015, 15: 165
- [36] Jensen K, Leefer N, Jarmola A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 160802
- [37] Xie Y, Yu H, Zhu Y *et al.* Science Bulletin, 2021, 66: 127
- [38] Chen X, Zou C, Gong Z *et al.* Light: Science & Applications, 2015, 4: e230
- [39] Maletinsky P, Hong S, Grinolds M *et al.* Nature Nanotechnology, 2012, 7: 320
- [40] Schirhagl R, Chang K, Loretz M *et al.* Annual Review of Physical Chemistry, 2014, 65: 83
- [41] Lovchinsky I *et al.* Science, 2016, 351: 836
- [42] Albrecht R, Bommer A, Deutsch C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 243602
- [43] Wang J F, Liu L, Liu X D *et al.* Nature Materials, 2023, 22: 489
- [44] Yuan J, Yang W, Jing M *et al.* Reports on Progress in Physics, 2023, 86: 106001
- [45] Gustavson T L, Landragin A, Kasevich M A. Classical and Quantum Gravity, 2000, 17: 2385
- [46] Zhang Y, Li J J, Jiang Q Y *et al.* Journal of Magnetic Resonance, 2022, 344: 107295
- [47] Kornack T W, Ghosh R K, Romalis M V. Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 230801
- [48] Saywell J C *et al.* Nature Communications, 2023, 14: 7626
- [49] Soshenko V V, Bolshedvorskii S V, Rubinas O *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 197702
- [50] Jarmola A *et al.* Science Advances, 2021, 7: eabl3840

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——《物理》四十年集萃

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所
帐号：11 250 1010 4000 5699
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话：010-82649029; 82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠物理类科普图书或《岁月留痕——《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科学院南路支行

