

类原子晶体缺陷:从量子计算到生物学探针

(中国科学技术大学 丁哲、谢天宇、杜江峰 编译自 Lilian Childress *et al. Physics Today*, 2014, (10): 38)

基于量子力学原理的装置可以快速解决某些经典计算模式难以解决的问题,正是量子装置的这个优越性催生了多个相关领域的快速发展,如量子计算、量子通信、精密测量和成像等。量子相干性是量子优于经典的本质原因,而孤立原子和固态体系是两种具有良好相干性的理想体系。离子阱及冷原子等孤立体系可以有效地隔绝外界噪声且容易实现精确操控;而诸如超导约瑟夫森结和量子点等固态体系则能够束缚有相互作用的电或自旋量子比特,具有可扩展的优势。晶体中某些杂质有电子束缚态,而晶格隔绝了部分噪声,因此类原子的晶体缺陷结合了上述两种体系的优势,这为固态体系的量子计算提供了良好的条件。我们还可以利用声子、光子将多个比特耦合起来,而固体本身在室温大气环境下可以保持稳定状态,又可以方便地集成到其他器件中。

金刚石NV色心由氮杂质原子与相邻的空位组成(以下如无特殊说明,均指带负电的 NV^-)。首先,

NV色心具有三能级的基态结构,如图1所示;其次,特殊的光学性质使NV色心能用光学共聚焦方法初始化和探测;再者,室温下超纯金刚石中的自旋比特与声子和其他自旋热库的相互作用都很弱,NV自旋可达毫秒量级的超长相干时间,单量子比特操作次数可以达到百万量级。这三个特性使NV色心成为一个非常好的量子信息储存和调控的室温固体单自旋基质材料,同时在灵敏探测等领域具有广泛的应用前景。

与电子自旋相比,核自旋的相干时间更长。我们可以将核自旋作为量子寄存器,通过其与NV的耦合读出其状态。目前室温下 ^{13}C 核自旋相干时间达秒以上,低温下可达分钟或更长。但要想在此体系的可扩展性方面取得突破性进展,则需将其与光子、声子等体系耦合。

要想实现大规模自旋的耦合,光子或声子等媒介必不可少。以光子为媒介实现无直接相互作用的NV自旋耦合的方案已被实验实

现。而光学谐振腔可以增强收集效率和耦合强度,纳米光学系统的出现,进一步促进了NV—光腔耦合的研究。

将机械振子的振动模式——声子与自旋耦合,是另一种杂化体系扩展的方式。金刚石本身也可以作为机械振子实现自旋—声子耦合。这两种实现自旋—声子相互作用的机制均需要高质量的机械振子和低温环境。

NV色心的优越性质使得其作为探针可对磁信号、电信号、温度及压力等进行探测,且具有如下优点:高磁场灵敏度 nT/\sqrt{Hz} 、纳米空间分辨率、温度适用范围广、发光稳定、不易漂白等。尤其是室温大气的工作条件使得其在生物等多个领域已经取得一系列重要进展。NV满足生物研究要求的常温及化学惰性。金刚石微晶中NV可用于监测某一细胞局域温度的变化。此技术甚至可能最终用于选择性杀死癌细胞。

NV色心量子调控领域仍有大量工作要做,如在纳米尺度上控制NV色心位置、实现自旋与其他体系的强耦合等。NV实现灵敏探测方向,如磁共振成像则需要精确控制靶分子与NV的相对位置。

除NV色心之外,硅空位色心、硅中磷掺杂缺陷、碳化硅中很多缺陷等也被广泛研究。类原子缺陷可能成为优良的单光子源;量子中继器的研究则可促进远程量子通信的发展。

在生命科学领域,类原子生物探针将来有望用于单个复杂分子直接成像。电磁场和温度探测可用于温度诱导基因表达控制和肿瘤代谢研究。最后,类原子系统可能会用于非侵入性实时绘制大脑神经冲动。所有这些让我们看到一个令人兴奋的交叉科学研究前沿。

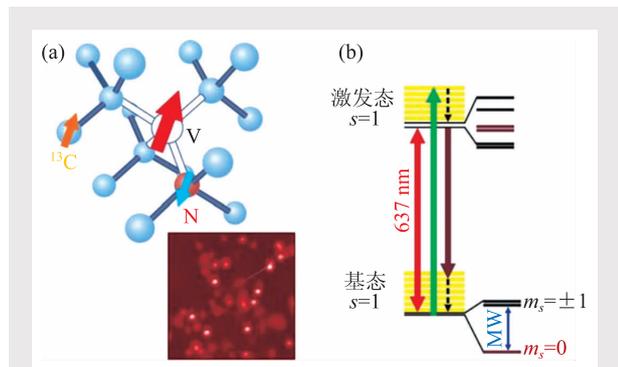


图1 (a)金刚石中NV色心的结构示意图,下方插图是NV在共聚焦平台上荧光图;(b)NV色心典型的能级结构图,包括三重基态和相应的激发态