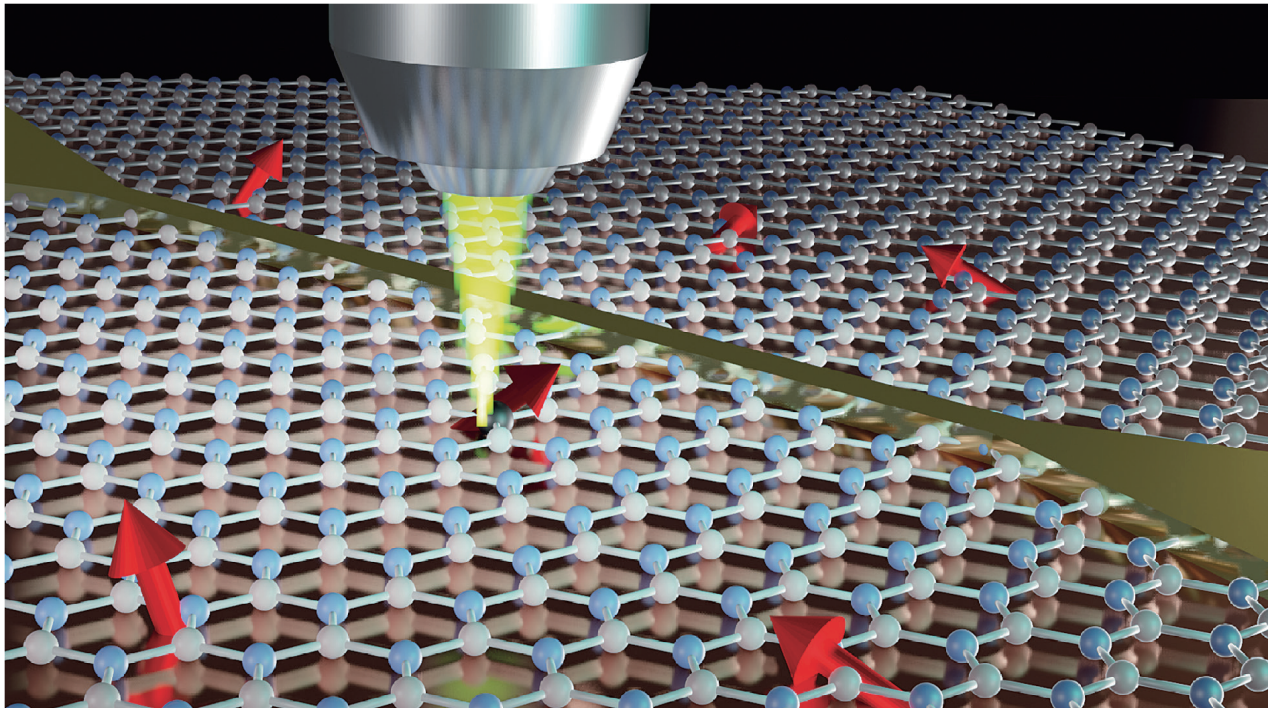




新材料驱动量子革命

(中国科学技术大学 曹刚 编译自 Katherine Skipper. *Physics World*, 2024, (9): 37)

每年英国物理学会(IOP)都会颁发 Henry Moseley 奖章,以表彰“在实验物理学领域做出卓越贡献”的早期职业研究者。2023年,由于在理解半导体及二维材料光物理方面做出的工作, Hannah Stern 荣获了这一奖项。她于2017年在剑桥大学获得博士学位,并继续作为研究人员开展深入研究。随后,她在曼彻斯特大学短暂任教,并于今年9月加入牛津大学担任副教授。Stern 领导的团队致力于为量子技术发展新平台,尤其关注可光学调控量子态的材料体系。近期,她与英国及澳大利亚的合作者共同完成的研究显示,在包含量子传感和量子光网络在内的量子技术领域,六方氮化硼(hBN)中的晶格点缺陷具有应用

潜力。

Stern 向 *Physics World* 杂志的编辑 Katherine Skipper 简述了自己的研究动机、量子领域当前所面临的挑战,以及她所期望的新研究小组的团队精神。

最初是什么激发了您对量子技术的兴趣?

我对量子力学一直很着迷。在新西兰奥塔哥大学读本科时,我主修物理化学,并学习和使用了光谱技术。在那些实验中,我们将光照射到材料上,通过分析收集到的数据在原子和分子层面来理解这些材料的电子结构。这令我非常兴奋,因为切身感受到了量子力学的作用。

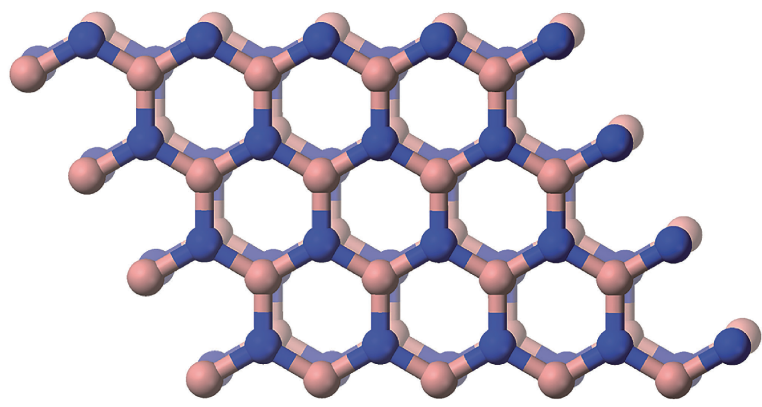
在攻读博士期间,我继续以不

同的形式研究和使用的形式研究,并对材料中可以被光激发的电子自旋态有了更深入的了解。但当时并没有思考过这对量子技术的影响,博士后阶段我开始对发射单光子的材料产生了兴趣,这时我才意识到之前一直从事的研究能在量子技术中发挥作用。

您的研究聚焦于量子技术中的光与物质相互作用。为什么光与物质相互作用对量子应用如此重要?

一直以来,光与物质相互作用构成了我们理解量子力学的核心。单粒子层面上控制光与物质相互作用,是当前我们利用量子效应去发展新技术的最有效的手段之一。

首先,量子技术需要与经典比



材料结构示意图。Hannah Stern和她的团队正在研究二维六方氮化硼中缺陷的自旋特性，这一体系在量子应用方面具有较好的前景

特对应的量子比特。简而言之，量子比特是一个可以处于量子叠加态的二能级系统。量子比特不仅可以由材料内与电、磁特性相关的能级跃迁来编码，也可以通过单光子来构造。针对不同的应用场景，这两类量子比特都是当前最前沿的研究方向。

光子可以在不丢失量子信息的情况下传输很长的距离，在需要传输量子态的场景(比如通信技术)中非常有用，例如这些量子信息可以编码在光子的偏振状态中。然而，物质中的量子比特，如电子或核自旋，往往在信息存储方面具有更好的持久性。通常情况下，它们也比光子更易于操控，因此更适合在器件层面执行逻辑操作，例如计算或模拟。

这意味着，虽然光子和物质量子比特可以各自用于量子技术，但通过发挥它们之间的相互作用，我们可以解锁全新的功能。一个很好的例子是“光量子网络”：长距离的光量子网络允许我们构建一个量子互联网，在这个网络中，量子信息可在不同节点间分布与传输，尽管它尚未实现。

这些节点中可以是物质中的量

子比特，它们作为本地量子存储器发送和接收来自光子的量子信息，这其中一个是备受关注的系统是材料中的原子级点缺陷，这正是我所专注的研究方向。

您研究物质中的哪类量子比特？这些系统如何与光相互作用？

物质中的量子比特通常来源于原子、分子中电子或核的自旋态跃迁，即“自旋量子比特”。自旋是量子力学中一个非直观的概念，代表粒子的固有角动量属性，没有经典对应形式。自旋是量子化的，这意味着粒子只能处于特定的分立自旋量子态中。

最简单的例子是单电子自旋，它的自旋态可以是向上、向下，也可以是这两种状态的叠加态。我研究的是一种缺陷中的自旋态，虽然原子、缺陷或分子的自旋状态会相对复杂一些，但一般仍然可以以这种方式考虑自旋状态。

我所研究的自旋量子比特的有趣之处在于，其状态可以通过光来控制。我们首先使用激光脉冲将量子比特初始化到一个特定的自旋状态，随后利用电磁脉冲进行操纵，

并通过第二个激光脉冲来“读取”演化后的状态。这个过程称之为光检测磁共振，它构成了我们使用自旋量子比特存储量子信息或感知环境的基础。

这一自旋量子比特形成于固体二维材料中的原子级点缺陷，即晶格空位。可以将这些缺陷视作晶格结构中缺失的原子。这种晶格空位等效于在晶体中形成一个与外界隔离的“囚禁分子”，并且在特定的光和自旋态之间能够产生跃迁，从而形成量子比特。

能够工作在不需低温或高磁场的常规环境，是固体中缺陷可以用于量子应用的一个显著优势。实验中的自旋操控脉冲通常在微波或射频波段，很容易在室温下利用片上手段完成，而其他类型的量子比特很难在同样的环境和条件下实现。

自旋量子比特有哪些应用？

除了光量子网络，另一个重要应用是量子传感。大多数传感器测量的是体平均或空间平均的物理量。而基于单个电子自旋的传感器本身就是原子级的，可以以接近原子级的高空间分辨率测量物理量，这一特征十分令人兴奋。

目前量子传感领域一个非常活跃的方向是纳米尺度的量子磁力计。外部磁场会改变自旋量子比特的自旋态能量，测量自旋态的能量变化(利用光检测磁共振)，就可以计算出某个精确位置的磁场大小及方向。因此，通过扫描样本上的量子比特，量子传感能以前所未有的方式观察材料的纳米级磁性。

哪些材料具有可以用于量子技术的自旋特性？

多个因素共同决定了某种材料

是否可用于量子技术，同时还要考虑到目标技术自身的需求。通常来说，材料中的自旋量子比特需要有长自旋相干时间，即能够保持量子信息的时间。

对于量子传感，通常相干时间越长，传感器就越灵敏。而对于光子网络，相干时间限制了光子可以发送的距离。这两种应用通常都需要至少几毫秒的相干时间。

自旋量子比特的相干时间受到一系列环境因素的影响。对于基于缺陷的固态自旋量子比特，通常会受到邻近核自旋和电子杂质的磁噪声影响。这意味着需要把自旋比特“隔离”起来，因此一般使用自旋活性 (spin-active) 原子核丰度低的材料，例如金刚石。

您最近研究了 hBN 中缺陷的自旋特性：它在量子应用上有何吸引力？

六方氮化硼是一种宽带隙二维材料。由于它是绝缘体，原来预期它不会与可见光相互作用，但 2016 年左右，在 hBN 中观测到了可见光局域发射。

有人提出这种发射来自晶格中的点缺陷，当我对此感兴趣时，已经有大量光学表征缺陷的工作，但仍不知道这种光学跃迁是否能够与缺陷的电子自旋状态发生相互作用。

当时已经有了金刚石中的氮-空位中心以及碳化硅中的一些其他缺陷，但其他能够获得可光学寻址的电子自旋量子比特的缺陷是非常罕见的。

我们在最近的一篇论文中展示了这些缺陷的自旋状态，可以使用光对它们进行初始化、操控，然后读取。同时，在室温下这些缺陷持

续存储量子信息的时间可以达到几个微秒。

此外，许多自旋量子比特的操作离不开磁场，磁场要么用于初始化量子比特，要么将自旋量子比特跃迁与其他电子跃迁分开。但在这个工作中，我们可以在没有磁场的情况下控制自旋。虽然与其他系统相比，相干时间仍然相对较短，但这都是在常规环境和全新材料平台上实现的。

这是首次在层状材料而非块状晶体中研究具有此类特性的自旋缺陷。二维材料在制造方面具有天然优势，它们可以轻松实现转移，可与其他材料和光学元件(如波导或腔)实现表面贴合。耦合块状晶体中的光子和这些光学器件具有巨大的挑战性，因此，未来利用二维材料的这些优势有望改善缺陷发射出的光的收集效率。

所有这些特性都非常令人兴奋，因为它们说明这些前景都有望在现实生活中工作的器件中实现。

hBN 走出实验室到实际应用，还需要做哪些进一步的工作？

还有很多工作要做。我们对同时使用 hBN 中缺陷自旋和光子的技术感兴趣，虽然在理解自旋方面取得了一些进展，但在光学特性方面还有更多的未知需要继续探索。面临的一大挑战便是确定缺陷的化学结构。我们认为它与插入晶格的碳有关，但其确切排列仍未知，我们正与理论研究者一起努力探究。

下一步还包括与合作者一起更好地生长 hBN，控制其在我们设定的位置产生缺陷。这是一个巨大的挑战，但二维材料提供了这种可能性。

更进一步的工作包括与对此领域感兴趣的公司合作，最终目标是在完整器件中应用这种材料。

量子领域一直在快速发展，但这项技术在商业化道路上最重要的挑战是什么？

目前而言，我们在实验室展示了很多量子领域的前景，然而扩展相关的挑战亟待解决。对于利用固态自旋进行量子计算而言，这意味着需要扩展到更多比特，对于光学网络而言，这意味着需要扩展到更多节点。

还有与材料开发相关的挑战。为了实现扩展，我们需要在不同材料间实现交互，并将量子系统与经典电子学组件和光学组件连接。在这一目标中，我特别感兴趣的是在新材料中识别新的量子系统，提供现有体系之外的优势或替代的方案。

研究其他材料系统，并借此以构建更广泛的材料工具箱，也是该领域一个令人兴奋的新方向。

您最近拥有了自己的研究小组，希望成立的研究小组的宗旨是什么？

我希望成立的小组是多学科和跨领域的，研究领域将涵盖物理、化学、材料科学和电子工程。小组中需要有各种不同的观点和科学背景，这能激发创造力和冒险精神。在一定程度上最初对 hBN 中缺陷的研究就是一种冒险，因为我们一开始对它是完全未知的。

我还希望建立的小组是一个欢迎任何背景、国籍或少数族裔的团队，具有包容性和社会代表性是十分重要的。我会努力让它保持这种状态。