

量子传感助力医疗健康

(北京航空航天大学 杨雪莹、林忻妍、耿立升 编译自 Matt Jones, *Physics World*, 2025, (7): 31)

值此2025年“国际量子科学与技术年”之际，全球目光聚焦于量子物理在计算、通信与密码学等领域的突破，而其在医学与健康保健领域的潜力同样显著，尤其是量子传感技术。量子传感器可助力研究人体机理，提升医学诊断能力，多项相关系统正迈向商业化；未来量子计算机也可能通过精准表征原子结构、加速药物反应计算辅助新药研发。英国创新署2024年10月发布的《Quantum for Health (量子赋能生命)》报告，为拓展量子物理在医疗健康领域的应用前景、挖掘实际应用提供了部分答案。本文基于该报告，聚焦更接近实际部署阶段的量子传感技术。

传感器的重要性

量子科学在医疗健康领域的重要性早已被认可。2013年，英国学术界与政府代表在奇切利庄园制定“国家量子技术计划”时，医疗健康就被确立为主要应用方向之一。该计划投入10亿英镑协调全国量子研究力量，后又续期十年，医疗健康仍是核心任务。

当前多数大型医院使用的磁共振成像(MRI)设备，便是基于量子原理的传感器。这项技术诞生于20世纪70年代，通过磁场和射频波控

制氢原子的量子自旋状态，测量自旋弛豫时间，实现脑部等软组织的成像，如今已成为现代医学诊断不可或缺的工具。虽然MRI依赖原子的量子特性进行工作，但其传感器本质上仍属于经典物理系统，由探测原子自旋方向变化产生磁通量的电磁线圈构成。近年来，新一代纳米尺度量子传感器不断涌现，灵敏度足以探测特定生物系统中极微弱的磁场信号。与此同时，还有一些量子传感器仅由单个原子构成，能够监测环境中的微小变化。正如《量子赋能生命》报告指出，众多量子技术企业与研究机构正在探索医疗健康领域的应用，诸多利用光子、电子和金刚石等材料内部自旋缺陷工作的量子传感器前景广阔。然而，最终决定其价值的，是量子传感器在医疗环境中所能实现的功能与成效。

量子诊断

《量子赋能生命》报告将医疗健康领域的量子传感技术明确分为五类。第一类是“实验室诊断”，即专业人员借助量子传感器观测人体的内部状态，通过监测体内温度变化、细胞成分等指标，助力识别癌症等多种疾病。

当前癌症确诊的金标准仍是活检——获取活体细胞样本后在实验室用显微镜检测。活检多在可见光下进行，有可能损伤样本，增加诊

断难度。另一种方法是红外辐射，通过分析细胞对特定波长的吸收谱识别潜在的化学成分，追踪癌变相关分子变化，但红外信号易受背景噪声的干扰，且红外相机成本远高于可见光设备。

2019年，伦敦帝国理工学院孵化的企业 Digistain 提出替代方案，其开发的 EntangleCam 系统利用一对纠缠光子进行诊断：一个为红外光子，另一个为可见光子(图1)。当红外光子被乳腺癌细胞等物质吸收时，与其纠缠的可见光子会立即受到影响，通过成本低且高效的探测器探测可见光子，即可间接获取红外光子及潜在癌细胞的相关信息。该技术有望用于肿瘤形成前的癌症快速诊断，但仍需肿瘤学专家确定适合检测的区域。

即时诊断

第二类应用是“即时诊断”。这一概念在新冠疫情期间广为人知。侧流免疫层析试纸是全球检疫的重要工具，其不限地点、快速、简便、可靠且成本低廉的优势，让实验室技术得以广泛应用于家庭。量子技术的引入有望进一步推动此类检测的微型化与高精度发展，适用于医院、诊所乃至家庭。

当前疾病的生物标志物检测通常依赖荧光标记分子，测量其发光位置、时间与强度，但部分分子的自然荧光会导致测量结果需要去除

DOI: 10.7693/wl20250807

CSTR: 32040.14.wl20250807

背景噪声。一种新兴量子解决方案是通过测量生物样本的微弱磁场表征其特性，这可借助含氮—空位(NV)色心的金刚石等材料实现。在金刚石晶格中，移除两个碳原子后，在一个空位植入氮原子，该氮原子与邻近空位形成NV色心，这种点缺陷类似具有离散能级的原子，自旋态受局部磁场影响，可通过发出的荧光“读取”。

英国公司Element Six与美国公司QDTI联合开发出一种基于单晶金刚石的量子传感设备，用于快速检测血浆、脑脊液等体液样本中的生物标志物，通过检测特定蛋白质产生的磁场，可以助力阿尔茨海默病等神经退行性疾病及多种癌症的早期诊断。德国QTAS公司也在使用单晶金刚石设备探查癌细胞。

Element Six的量子技术主管Matthew Markham指出，医疗健康领域已成为公司“关键转折点”：“几年前这类研究还主要在学术层面，如今技术正应用于实际场景，并通过实地测试逐步进入应用阶段。”

具有NV色心的纳米级金刚石颗粒因生物相容性高成为另一选择。例如，荷兰QT Sense公司正开发基于纳米金刚石的纳米MRI扫描仪，检测具有内禀磁场的分子浓度，该设备已用于单细胞水平的生物医学研究(图2)。澳大利亚的FeBI Technologies公司则正开发基于纳米金刚石的设备来测量铁蛋白(一种人体内储存铁的蛋白质)所产生的磁场，其检测灵敏度较传统MRI高出9个数量级，未来能使患者实现对血液铁含量的精准且低成本监测。

可穿戴医疗

第三类应用是“消费者医疗监测与可穿戴健康设备”，它可以帮助

人们在日常生活中持续监测健康状况，对糖尿病、高血压等慢性病患者尤为实用。

2022年由英国利兹大学孵化的NIQS Tech公司正开发高精度、无创传感器以监测血糖水平。传统血糖监测方法有创且疼痛，多需针头刺入体内；新型光学光谱测量技术对深肤色患者检测效果较差。而NIQS Tech的传感器采用掺杂二氧化硅，利用量子干涉效应工作：当传感器接触皮肤并照射激光时，产生的荧光信号寿命与用户血液中葡萄糖的浓度相关，且不受肤色影响。该技术已在实验室完成概念验证，目前公司正致力于小型化，以开发持续监测血糖的可穿戴设备。

人体成像

第四类应用是“人体扫描”，旨在实现无需侵入性活检的诊断。诺丁汉大学孵化的Cerca Magnetix公司是该领域的领先企业之一。2023年，该公司针对脑磁图(MEG)成像开发的“可穿戴光学泵浦磁力计”——用于测量大脑神经元放电产生的磁场，荣获英国物理学会首届qBIG量子创新奖，其能在患者舒适坐姿乃至活动状态下进行脑部扫描。

量子扫描技术还可用于乳腺癌诊断。当前乳腺癌诊断多依赖于低剂量X射线乳腺摄影，但乳腺由低密度脂肪和高密度组织混合构成，后者会在影像中形成“白色暴风

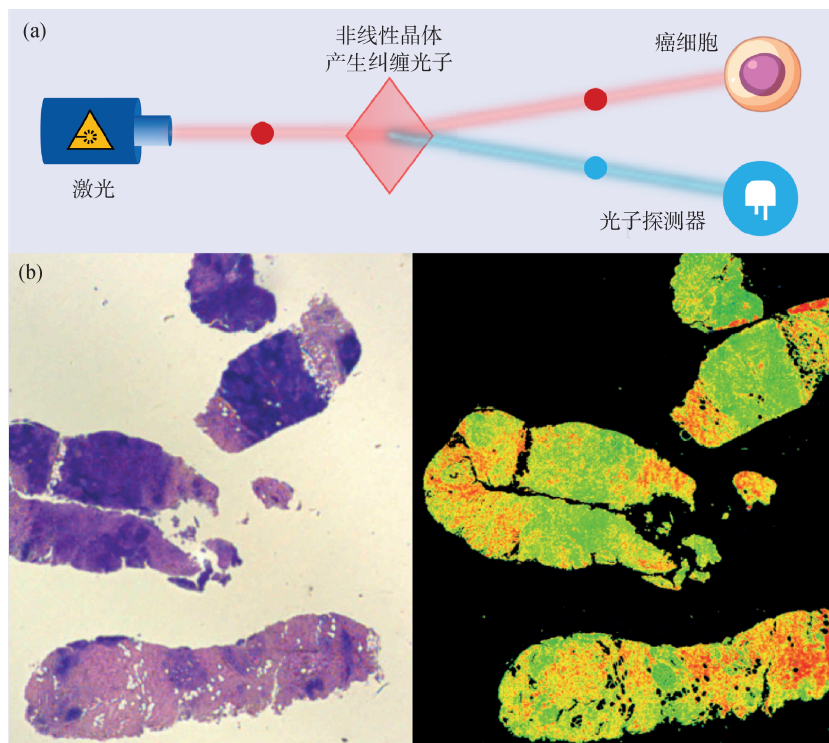


图1 (a)量子物理惠及医疗健康的典型例子：将激光束照射至非线性晶体以产生纠缠光子对。在这一过程中，每个激光光子会通过“自发参量下转换”被转化为两个低能量光子——一个处于可见光波段，一个处于红外波段。在英国公司Digistain首创的技术中，红外光子被引导穿过生物样本，可见光子则被探测器接收。由于两个光子存在量子纠缠，可见光子携带的信息可用于推断红外光子的行为，从而识别样本中是否存在癌细胞等异常组织；(b)左图为传统染色活检下的细胞，右图为采用Digistain方法成像的细胞

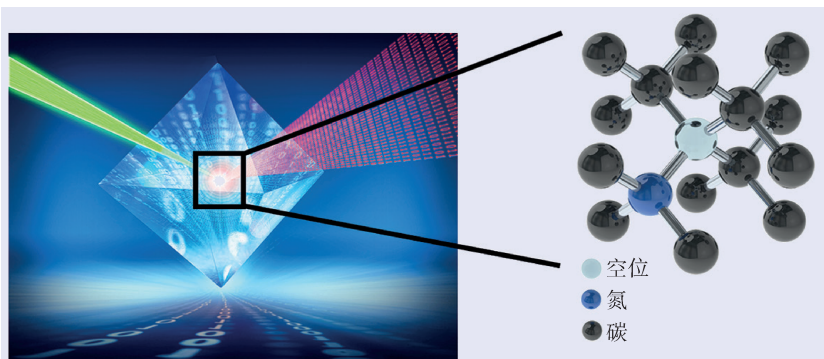


图2 金刚石中的氮—空位缺陷(即NV色心)是通过从晶格中移除两个相邻的碳原子,并在其中一个空位处植入一个氮原子,另一个空位保留为空缺形成的。绿色激光脉冲将NV色心从基态激发至激发态。当激光关闭后,NV缺陷发出可被探测的可见光光子并回到基态。然而,在激光关闭期间,荧光强度衰减的速率取决于局部磁场的强度。正如Element Six和QT Sense等公司所发现的,金刚石中的NV色心是测量人体内磁场的优异手段,因为NV色心周围的碳原子晶格结构能有效屏蔽外部噪声

雪”效应,使健康组织与潜在恶性肿瘤难以区分,这对高密度组织占比更高的女性(约40%)是个难题。其替代方案是分子乳腺成像(MBI),它是对静脉注射的放射性示踪剂的分布成像。虽然示踪剂辐射剂量安全,但高于传统乳腺X射线摄影,且需较长成像时间以获取足够信号。

英国公司Kromek开发的解决方案采用碲锌镉(CZT)半导体探测器,仅需单个 γ 光子就能产生可测量的电压脉冲。CZT探测器在X射线和 γ 射线能区范围内效率高,且可集成于室温运行的小型芯片中。Kromek超低剂量超快探测器初步结果显示,仅需传统MBI所用示踪剂剂量的八分之一即可完成成像。Kromek首席物理学家Alexander Cherlin表示:“我们的原型机已展现出良好性能。”该公司目前正参与英国创新署资助的250万英镑“超低剂量MBI”项目,与纽卡斯尔的医院、伦敦大学学院及纽卡斯尔大学合作开发全尺寸原型相机。

显微技术的突破

第五类应用是“显微技术”。现代显微成像已不仅限于可见光,还

涵盖从拉曼显微镜、双光子显微镜到荧光寿命成像、多光子显微镜等多种技术。这些方法能够在不同尺度和速度下对样品进行成像,但均已接近各自工艺极限。

量子技术为突破这些极限提供了新可能。例如,格拉斯哥大学的研究团队利用纠缠光子对,通过“鬼成像”技术来提升显微成像性能:一对纠缠光子中的一个与样本相互作用,通过检测另一个未接触样本的纠缠光子来构建图像,如此可以有效规避低光成像中的噪声问题。

恩克莱德大学的研究人员利用纳米金刚石解决了生物样本中荧光染料最终会停止发光的问题。这种被称为光漂白的效应导致样本在特定时间后无法继续研究。他们结合双光子激发显微技术,实现了对样本的持续成像观察,同时将分辨率提升至原有技术的10倍。

未来展望

尽管量子传感器在医学领域潜力巨大,但真正应用于临床仍面临巨大挑战,尤其在规模化生产方面。临床应用要求设备高度可靠、成本

可控且易于量产。所幸近年来该领域进展迅速——自《量子赋能生命》报告于2024年底发布以来,已有多家初创企业致力于解决这些问题。

例如,布里斯托的RobQuant公司正在研发基于固态半导体的量子传感器,用于大脑非侵入式磁扫描。该传感器采用消费电子行业标准工艺制造,可灵活应用于不同身体部位扫描成像,且能在室温下稳定运行,无需额外加热或冷却系统。公司联合创始人兼首席技术官Agnethe Seim Olsen指出,实现传感器高鲁棒性与规模化生产是推动其进入医疗应用的关键。她认为,英国在量子传感器商业化方面已处于领先地位,并将进一步受益于新一轮国家级量子技术研究中心的建设。这些中心汇聚了学术界与产业界的力量,例如由伦敦大学学院牵头、总投资2400万英镑的“Q-BIOMED”生物医学传感中心,以及由伯明翰大学主导、投资2750万英镑的“QuSIT”成像与授时技术中心。

Q-BIOMED计划利用单晶金刚石与纳米金刚石开发和商业化新型传感器,实现癌症与阿尔茨海默病等疾病的早期诊断与干预。Element Six公司的Markham指出:“这些医疗愿景已不限于学术研究,全球已有众多初创公司专注于金刚石量子技术的开发。”

持续且深入的研究促成了初创企业的产生,进一步形成了联合学界和产业界的研究中心,如QuSIT中心的开创研究团队曾建立Cerca Magnetix公司。随着量子传感技术的持续成熟,也势必吸引现有医疗器械企业的加入。预计未来五年,量子传感器将在医疗健康领域实现高速发展与应用。