



宝石量子革命

(鹏城实验室 张飞昊、清华大学 龙桂鲁 编译自 Matthew Markham et al. *Physics World*, 2020, (4): 39)

金刚石广泛用于婚姻纪念，在工业上的影响也无处不在。如今它迎来了有深远意义的新应用：金刚石量子技术。

量子力学的诞生，导致影响我们生活的激光器和晶体管等技术的出现，这些依赖于量子力学效应的技术为“量子1.0”。现在世界各国都在努力开发“量子2.0”技术，它依靠操纵和读出量子态工作，利用量子叠加和纠缠。

量子技术的难点在于量子态太脆弱。理想情况下，这些态应该隔离，但是为了利用，还要与其发生相互作用。控制和相互作用之间的平衡是量子科学家必须要走的钢丝线。量子技术包括量子计算、模拟、通信和传感。它对医疗保健、新材料开发也具有潜在影响。目前有不同

的技术实现方案，如离子阱、超导、量子点、光子和半导体缺陷。每种方案都有优点和缺点。离子阱量子性能优异，但难集成；超导电路制作容易，却需低温下工作。金刚石折中了两者的优点：固态容易集成，且在室温下工作。

量子金刚石

对金刚石的许多研究都集中于识别碳晶格上的缺陷。一种缺陷是带负电荷的氮空位(记作NV)缺陷。1997年德国Jörg Wrachtrup等展示了氮空位缺陷可在室温下操作，引发了金刚石量子技术研究。用微波场扫描时，可观测到NV缺陷在绿光照射后的荧光变化，这就是NV缺陷的光探测磁共振。当微波场与自

旋量子数能级发生共振时，可观察到荧光减弱，从而读出缺陷的状态。

接下来的十年里，世界上一些研究组也开始这项研究，想把金刚石作为量子比特来制备量子信息器件(如量子计算机)。这项研究开始用的是被称为“神奇的俄罗斯钻石”的天然金刚石。2006年高纯度金刚石样品人工制备成功，使得更多的研究组加入研究。

2008年Wrachtrup团队等提出并演示金刚石磁场传感器。之后又陆续提出了许多关于氮空位缺陷的新应用。

金刚石是宽带隙材料，其缺陷可用激光操作。氮空位中心与周围晶格振动模式之间的相互作用异常微弱。金刚石的核自旋浓度低，缺

陷的自旋轨道耦合弱，退相干效应作用小，因此可制备在室温条件下退相干时间长达毫秒的样品。

金刚石的氮空位缺陷并非完美。理想状态下在637 nm处，所有发出的光子是无法分辨的。由于声子的作用，发出的光子波长从637 nm到800 nm不等，这给实际应用带来了挑战。金刚石难于加工和做成大块单晶。虽然科学家也在寻找其他材料，但尚没有其他材料可以替代。

金刚石器件

金刚石量子设备简单，由绿色光源、金刚石、小型微波源和光电探测器就可组成基本装置。其初始化和氮空位自旋读出简单，不需要专门的窄线宽激光器，甚至用绿色LED灯都可以。此外，由于可以检测到光的波长(637—800 nm)，还可用低成本的硅光电探测器读出。简单的演示装置的价格只有几千英镑，但是要实现性能的最大优化，还需要进行大量的工程设计。

研究基础物理和量子计算对金刚石缺陷要求极其严格，每个缺陷要相同，以相同的波长发光。然而，应力会改变光的波长，使两个氮空位缺陷产生差异。虽然可通过在缺陷附近施加电场的“斯塔克调谐”来使得发射波长一致，然而在测量过程中，氮空位周围的局部电荷结构仍然会发生变化，导致波长偏移。尽管如此，还是取得了一些突破性的成果，如2015年的“无漏洞贝尔不等式检验”。最近还报道了一个可储存高达75 s量子信息的10量子比特金刚石缺陷寄存器。

荷兰代尔夫特理工大学Ronald Hanson团队正在研究使用金刚石中的氮空位缺陷作量子网络的“量子中继节点”。这是长距离量子通信的必须设备。

另一应用是微波激光器。微波激光器具有高增益、低噪声等特点，被广泛应用于射电天文和深空

通信领域。由于在短时间内非常稳定，还可作为振荡器应用于全球定位系统。目前的微波激光器系统体积有些庞大，结构复杂，甚至还要求低温，要求金刚石处于高Q腔中，外加磁场稳定均匀，金刚石的温度波动极小。这些工程上的困难都需要解决。

用金刚石探测

金刚石磁场传感器在很多方面优于其他技术。就矢量传感器来说，四个不同的氮空位轴向可以用来重建一个矢量场，有巨大的带宽，对几个量级的磁场很敏感，而且不需要特殊的磁屏蔽。由于NV缺陷的特性，容易测量到单个NV的强电子偶极发光，从而可以在纳米尺度上测量磁场。虽然其竞争对手磁共振磁力仪同样可做到这点，但它们本身的磁性会扰乱待测量系统。许多研究组正在用基于氮空位的工具进行材料表征。位于瑞士的Qnami公司已在销售氮空位缺陷金刚石探测仪。

利用NV缺陷可提高设备灵敏度，但却降低了空间分辨率。作为折衷，在高纯度金刚石表面镀上几微米高含氮空位缺陷的金刚石用来对磁场进行成像，氮空位金刚石层的厚度决定了空间分辨率。

洛克希德马丁公司一直致力于研发金刚石磁力计，它不依赖外部信号。该技术利用金刚石磁力计的矢量能力来探测地球磁场的强度和方向。地球磁场随着人在地表的位置而变化，可以据此来进行定位。虽然没有卫星GPS精确，但可与现有技术互补。

这种传感器还可反向检测射频场。施加一个可控的磁场梯度，产生已知的塞曼能级变化。当施加未知频率的微波信号时，与该频率相对应的位置就会出现磁共振。这种方法可一次测量得到高达几十千兆赫的整个频谱，且分辨率高。该技

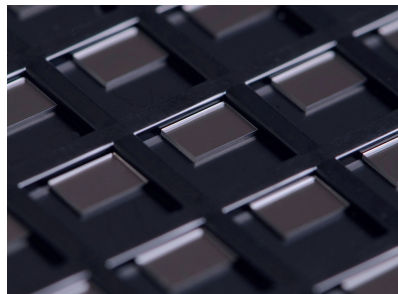


图1 微波辅助化学气相沉积法制备高纯单晶合成金刚石板材。每颗钻石约为 $4\times 4\times 0.5$ mm

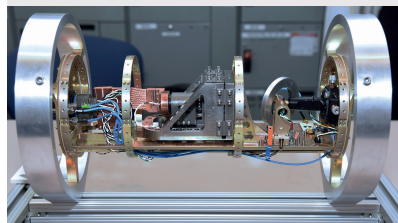


图2 Lockheed Martin 公司为全球定位系统设计金刚石磁力计。该系统只有鞋盒大小，还可缩小到冰球大小

术用于5G网络，可避免相邻基站间的干扰。

德国的新兴公司NVision等正在使用金刚石来增强磁共振成像，将其从解剖学成像转变为类似于正电子发射断层成像(PET)的分子成像。其原理是将电子自旋从氮空位缺陷转移到目标分子的核自旋。核自旋持续时间长，有助于测量。

金刚石量子前景

金刚石已经成为量子材料应用的宠儿，在世界上有200多个学术团体致力于其量子应用。研发金刚石量子技术的公司也越来越多。材料是这些技术的核心，但是需要大量工程工作来优化设备。

设备开发另一个障碍是缺乏有经验的量子物理学家。英国、欧洲和美国等正在抽调量子科学家去提供帮助。最后一个难题是，金刚石量子技术本身的应用市场难以预估。但有一点是肯定的：它是这个时代的大势所趋。