

碳化硅缺陷有望成为器件友好的量子比特

——广泛使用的商品级半导体晶片可在室温下进行相干操控

任何量子计算方案的中心元素都是量子比特,这是一种类似于自旋为 $1/2$ 的电子的双态体系.在计算过程中,量子比特的状态经历着各种变化;计算一旦完成,需要确定量子比特是“朝上”还是“向下”的.不幸的是,量子比特也要与环境相互作用,这会使其量子态遭受破坏,或者退相干.任何有用的量子比特,在进行一系列有价值的量子操作时,都必须抵抗退相干.

从约瑟夫森结到量子点,有若干体系都能满足这条标准.然而,几乎所有的固态体系都得降至低温才可获得适宜的相干时间.NV 色心是个例外,这是一种原子尺度的金刚石杂质,由两个相邻的碳原子被一个氮原子和一个空位取代而成.室温下,NV 色心的电子自旋态可保持相干时间超过 1ms.而且自旋态可以由微波操控,并通过荧光方便地读出.

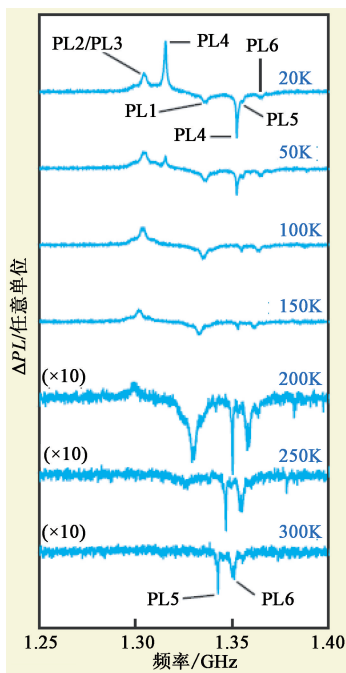


图 1 受微波辐射的碳化硅样品在 6 种荧光缺陷 (PL1—PL6) 的自旋共振频率处,荧光强度 P 有尖锐的改变 (在 PL4 对应的缺陷中,自旋—自旋劈裂造成了 2 个自旋共振频率).尽管自旋共振信号随温度升高而减弱,但 PL5 和 PL6 仍可坚持到室温了有前途的候选者,这是一种已被广泛用于高功率电子学的材料.虽然并不清楚新发现的量子比特当中有没有 NV 色心,但它们都是原子尺度的缺陷,其中两种在室温下具有长寿命的自旋态.

对低温碳化硅样品进行实验,荧光谱中显示出 6 条尖锐的发射线,波长大约从 1035nm 到 1135nm.其中四个峰,即 PL1—PL4,被证实并不源自 NV 色心,而是源自双空位缺陷——缺失了的相邻的碳原子和硅原子.另外两个峰,即

什么使得金刚石如此特殊?该问题是加州大学圣塔芭芭拉分校 (UCSB) 的研究者于去年提出的,他们由 David Awschalom 和 Chris Van de Walle 所领导.他们指出,金刚石如此特殊的原因在于,与电子基态和激发态的劈裂相比,金刚石具有较宽的带隙.这意味着嵌在金刚石里的 NV 色心在不丢失电子的情况下,可以被荧光探测.此外,金刚石较弱的自旋—轨道耦合及主要的自旋为 0 的碳核,有助于将环境对量子比特状态的影响最小化.

UCSB 小组认识到那些特性并不为金刚石所独有,并着手寻找可能承载长寿命量子比特的其他材料.他们在普通的碳化硅晶片中找到了

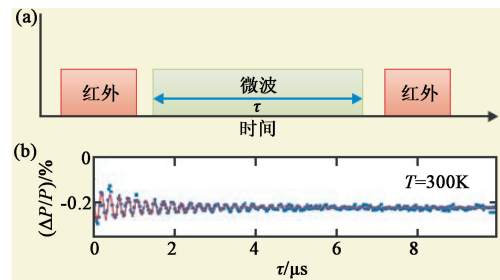


图 2 相干控制 (a)向碳化硅样品施加的脉冲序列:一束红外脉冲,一束长度为 τ 的微波脉冲,又一束红外脉冲.极化缺陷自旋,将自旋旋转,由此得出荧光强度的改变,并获知自旋的最终取向;(b)对于各种 τ 值重复此脉冲序列,得到数据点 (蓝色记号) 并拟合 (红色曲线) (见《物理》网刊彩图). 荧光强度 P 的振荡表明了电子自旋系综的相干旋转

PL5 和 PL6,之前未被探测到,来源于未知的缺陷.如同金刚石的 NV 色心,那些缺陷的电子自旋态,连同两种未知缺陷的电子自旋态,都可以通过荧光读出.如图 1 所示,受微波辐射的碳化硅在各缺陷的自旋共振频率处显示出荧光强度的尖锐升高或降低.尽管自旋共振信号随温度升高而减弱,但 PL5 和 PL6 对应的峰仍可保持到 300K,所以这些缺陷自旋态在室温下可读出.

与金刚石的 NV 色心类似,仿照核磁共振的技术,可以控制碳化硅缺陷自旋的取向.图 2 显示了下面的一个例子,研究者用红外脉冲极化了一个缺陷自旋系综,用微波脉冲旋转系综,并通过荧光探测了自旋取向的振荡.研究者通过施加更精巧的脉冲序列,展示了对低温样品的超过 $100\mu\text{s}$ 的自旋相干控制,以及室温下超过 $40\mu\text{s}$ 的相干控制.这说明碳化硅的缺陷自旋可以像金刚石的 NV 色心那样被迅速翻转.

实验在缺陷系综上进行;这些毫米尺寸的碳化硅样品,每立方微米大致含有 100 个缺陷.体现缺陷的量子比特效用的关键在于,每个缺陷都能被单独地控制. Awschalom 说:“挑战之一是探测单光子发射.”这一任务在可见光区域相对容易,在近红外区域却困难得多.此外,实现量子器件的关键在于多量子比特间的纠缠,并将其集成于特定结构当中.

碳化硅缺陷在近红外区域发光,并且在光导纤维的带宽附近,这最终将成为一项重要优势. Awschalom 说:“这意味着,你可能会在电子学材料上、在远程通信频段、在室温下进行量子操控.”作为操控金刚石中单个缺陷自旋态的开拓者,德国斯图加特大学的 Jörg Wrachtrup 看到了碳化硅缺陷在量子计算之外的潜在应用.他指出,这些缺陷有望做成超灵敏磁计. Wrachtrup 说:“我可以预见,碳化硅微晶将用来对细胞及其他生物体系做微纳量级的磁共振成像.它的确可以开启科学应用的一个新领域.”

(中国科学技术大学 杜江峰、马文超 编译自 Ashley G. Smart, *Physics Today*, 2012, (1):10, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)