

Light 六方氮化硼中多波长自旋缺陷动力学

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42842.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

Light 六方氮化硼中多波长自旋缺陷动力学。导读

在量子传感与量子信息处理领域，固态自旋缺陷是核心研究平台，二维六方氮化硼（hBN）的特殊自旋缺陷凭借多重自旋跃迁特性，为高性能二维量子传感发展提供了全新路径。近日，澳大利亚悉尼科技大学Igor Aharonovich团队系统揭示了六方氮化硼中复合型自旋缺陷的激发动力学规律，探明了激发波长对该类缺陷自旋依赖荧光特性、自旋动力学行为的调控机制。研究团队通过探究不同激发波长下缺陷的光学响应与自旋演化特征发现，优化激发波长可实现光探测磁共振对比度与磁场灵敏度三倍量级提升，同时激发波长可显著调控该类自旋复合发光体系的光动力学行为。该研究厘清了hBN复合型自旋缺陷的激发作用机制，明确了激发波长在量子传感性能优化中的关键作用，为二维材料自旋缺陷在量子传感及量子技术领域的性能迭代与应用落地提供了重要理论支撑。

该研究成果发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为Multi-Wavelength Spin Dynamics of Defects in Hexagonal Boron Nitride，悉尼科技大学的Ivan Zhigulin 与 Nicholas P. Sloane为论文共同第一作者，Igor Aharonovich与 Mehran Kianinia为论文共同通讯作者。

研究背景

可光学寻址的固态自旋体系是量子传感与量子通信领域的核心研究平台。相较于金刚石、碳化硅等传统三维自旋缺陷材料，hBN凭借独特的范德华二维层状结构，具备原子级薄层剥离、可集成于光子与光电器件的天然优势，是高性能二维自旋缺陷量子器件的理想载体（见图1a）。

目前hBN体系的自旋缺陷研究主要集中于硼空位缺陷，该缺陷可实现室温零场光探测磁共振响应，已初步应用于磁场、温度、压力等多物理量传感。但该体系存在明显短板，至今尚未观测到单硼空位缺陷，极大限制了其在量子信息领域的拓展应用，同时量子效率偏低、零声子线暗态等问题，也制约了其传感性能的进一步优化。

为此，学界新近发现了一类新型hBN自旋复合缺陷，凭借高亮度发光、单光子发射特性及可见光至近红外波段的宽域零声子线优势，弥补了传统硼空位缺陷的诸多不足。更具研究价值的是，该自旋复合缺陷同时具备 $S=1$ 与 $S=1/2$ 两类自旋跃迁模式，为hBN体系的量子传感与自旋操控提供了全新的物理平台。但现阶段，激发波长对该类特殊缺陷的自旋动力学行为、光探测磁共振信号对比度及光致发光稳定性的调控机制尚不明确，波长依赖的自旋-光子动力学演化规律仍缺乏系统阐释，成为制约其量子传感性能优化与工程应用的关键瓶颈。

创新研究

针对hBN自旋复合缺陷在量子传感中对比度低、灵敏度受限的关键瓶颈，研究团队创新性地开展多波长自旋动力学系统研究（见图

1）。通过细致对比不同激发波长下的光探测磁共振信号与自旋动力学行为，该研究证实 633 nm 波长激发能显著增强亚稳态自旋能级耦合，将磁共振对比度提升至近一倍、磁场灵敏度提升三倍，从根本上解决了传统单一波长激发下信号弱、灵敏度不足的核心问题。

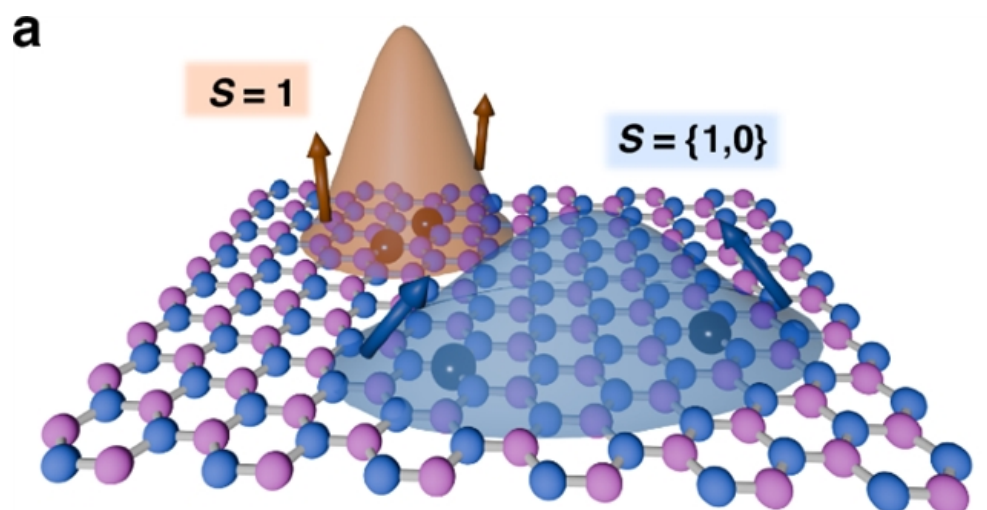
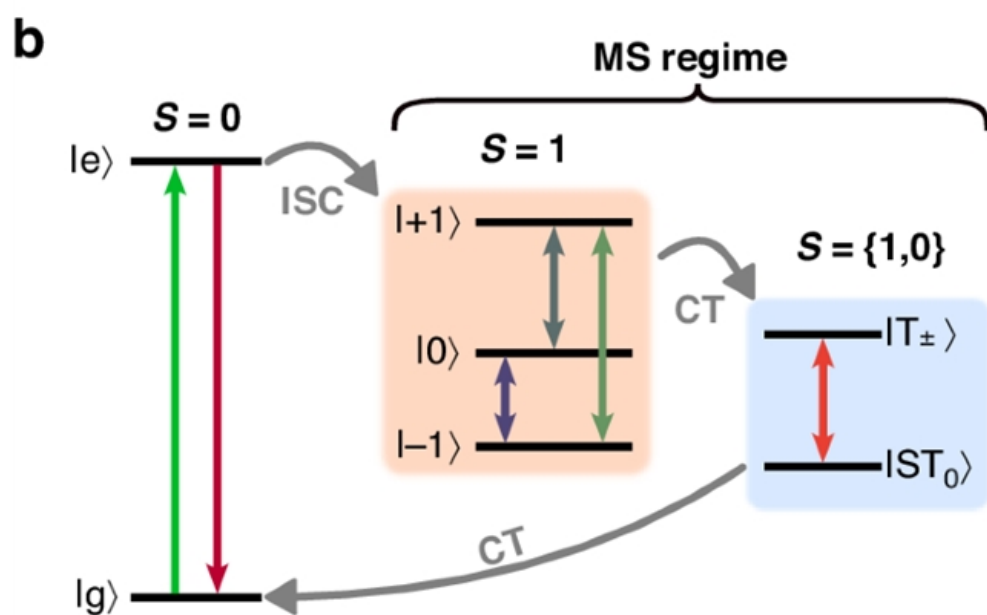
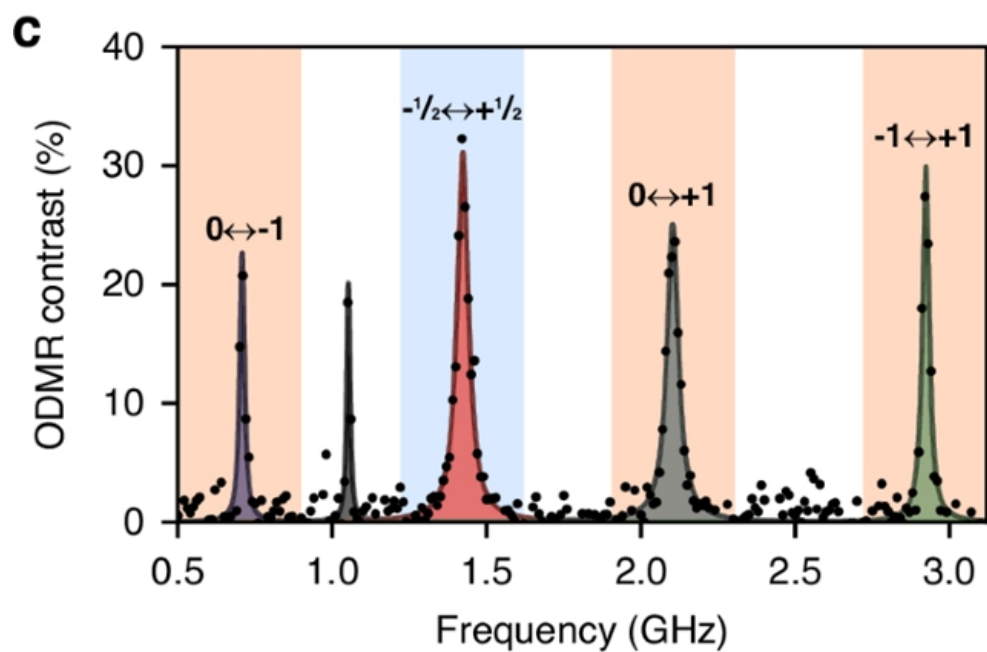


Fig. 1图1：六方氮化硼中的自旋复合缺陷。

在实现高对比度自旋信号的基础上，研究团队进一步构建双波长协同激发实验方案并建立物理模型（见图2、图3）。通过在633 nm主激发中引入弱功率532 nm辅助光，有效抑制缺陷发光的随机闪烁现象，同时保持磁共振高对比度，清晰阐明了不同波长激发态对亚稳态能级系间窜越效率的调控机制，成功解决了高信号质量与发光稳定性难以兼顾的突出矛盾。

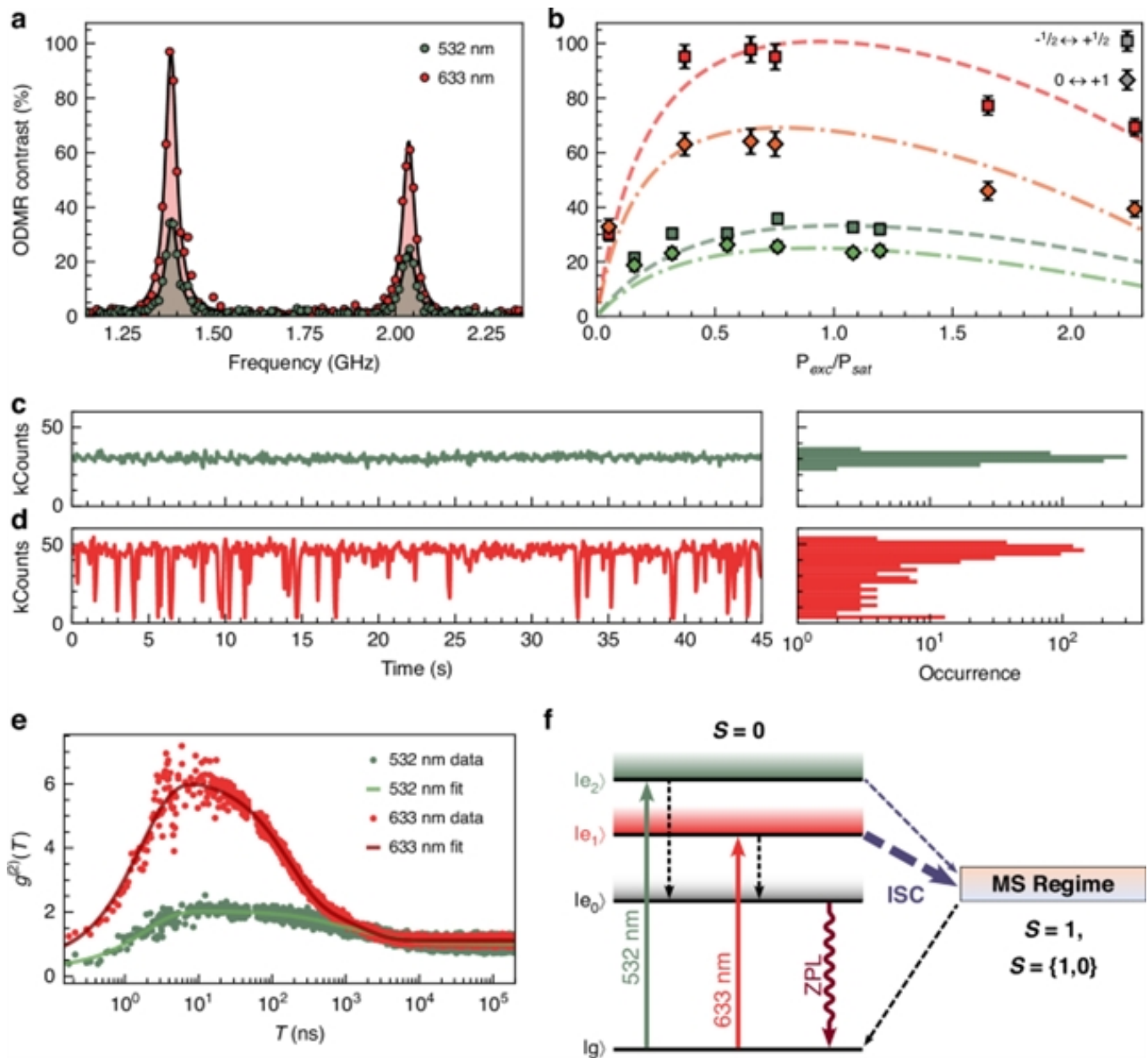


Fig. 2图2：不同激发波长下自旋复合缺陷的行为特性。

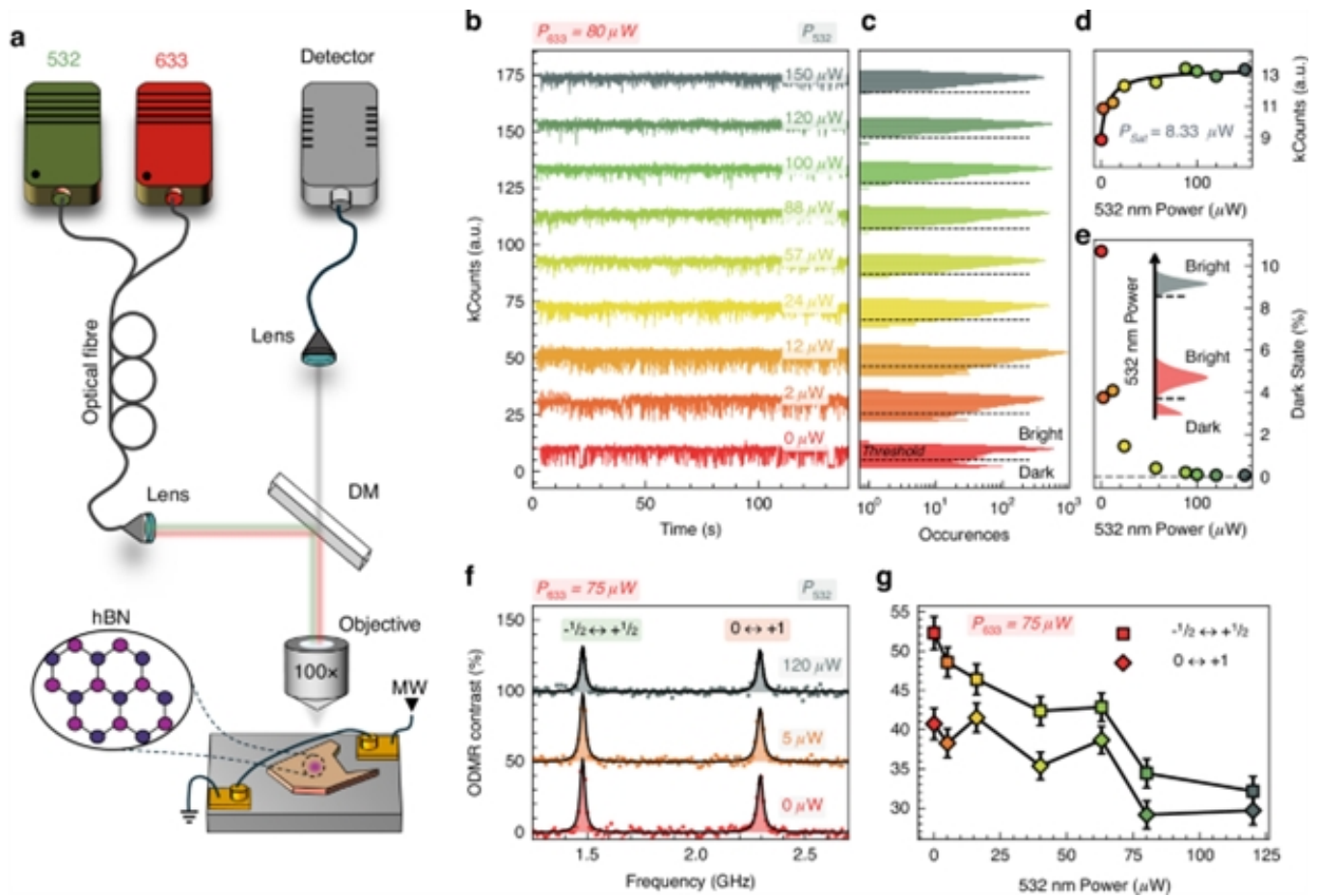


Fig. 3图3：633 nm 与 532 nm 双波长共激发下的自旋复合缺陷特性。

为深化物理机制并拓展应用场景，研究团队在低温条件下开展多波长激发与光谱分辨磁共振测量（见图4）。低温环境有效抑制热展宽、降低背景噪声，明确了接近零声子线的波长激发对高对比度信号的增强作用，同时证实自旋复合缺陷的两个光谱分量与亚稳态能级耦合均匀，为激发波长优化提供了可靠物理依据，也为二维材料自旋缺陷在高灵敏度量子传感与超分辨成像领域的实际应用奠定了坚实基础。

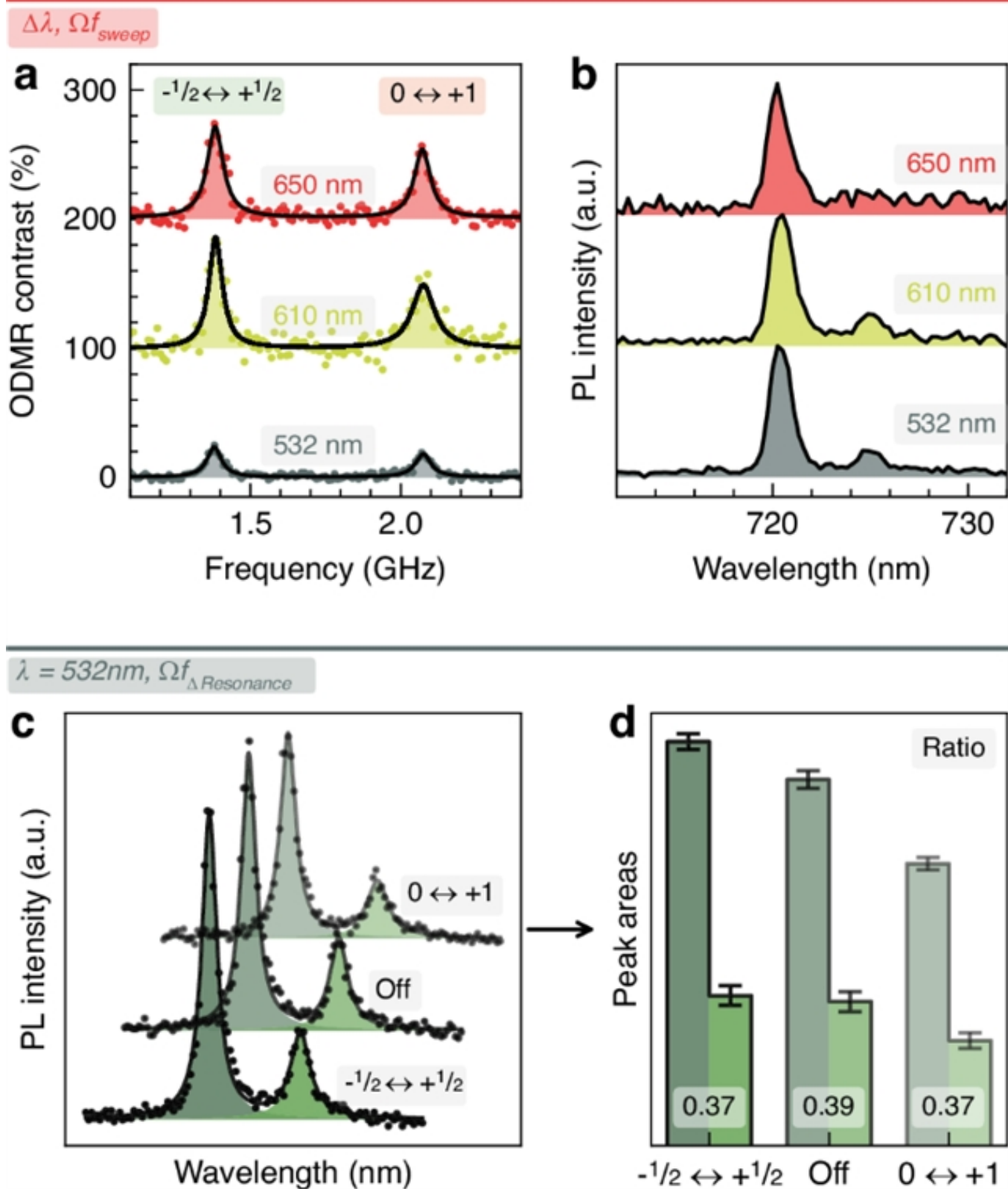


Fig. 4图4：低温（25 K）下的多波长激发与光谱分辨磁共振测量。

总结与展望

该研究系统阐明了hBN中自旋复合缺陷的多波长自旋动力学规律，明确了激发波长对磁共振对比

度、磁场灵敏度及发光稳定性的调控机制，建立了双波长协同激发的调控方案，验证了波长优化策略在提升二维材料自旋缺陷量子传感性能方面的可行性与有效性。

未来可进一步拓展激发波长范围，深入揭示不同缺陷构型对应的最优激发条件，完善多波长调控的物理模型。同时结合低温光谱技术与超分辨成像方法，深化自旋动力学与光致发光行为的关联研究，推动hBN自旋缺陷在高灵敏度量子传感、量子成像及片上量子信息器件领域的实用化与规模化发展。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02398-z>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Mehran Kianinia 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发