



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

다이아몬드를 이용한 양자 센싱 및 이미징 연구동향

[작성: KAIST 물리학과 김동규 교수]

양자 컴퓨팅, 양자 보안과 같은 차세대 기술은 양자 시스템이 가지고 있는 고유의 양자적 특성에 근거합니다. 양자 시스템은 큐비트(quantum-bit 또는 qubit)를 기본 단위로 구성되는데, 잘 제어된 큐비트 사이에는 양자적 다체 결맞음(many-body coherence)이 존재합니다. 다체 결맞음은 양자 중첩(entanglement)과 같은 양자 비국소성(non-locality)의 핵심이 되는 양자 시스템의 고유한 특성으로, 이를 이용한 정보 처리 및 통신은 기존의 컴퓨팅, 통신 기술로는 불가능한 연산 속도와 보안을 가능하게 합니다.

이와 같은 양자 이점(advantage)을 보일 수 있는 또 다른 양자 기술의 예로 양자 센싱(sensing)이 있습니다. 양자 센싱은 양자 시스템의 결맞음을 이용해 자기장(magnetic fields), 온도와 같은 외부 물리량을 정밀하게 측정하는 양자 기술입니다. 이는 외부 환경에 매우 민감하게 영향을 받는 양자 시스템의 수동적 성질을 능동적으로 이용하여, 외부 환경의 물리량을 정확하게 측정하는 역발상적 기술입니다. 특히, 양자 시스템의 다체 결맞음을 이용한 양자 센싱은 고전적 표준양자한계(standard quantum limit) 이상의 센싱 민감도(sensitivity)를 가능하게 하여, 양자 역학을 이용하지 않는 방법으로는 구현 불가능한 양자적 이점을 제공합니다.

양자 센서의 대표적인 예로 다이아몬드 질소-공공 센터(NV center)가 있습니다 [그림 1]. NV 센터는 상온에서도 우수한 양자 특성을 지니며, 효율적이며 비파괴적인(nondestructive) 스핀-광자(spin-photon) 인터페이스를 가지고 있습니다. 이를 바탕으로 NV센터를 이용한 양자 센싱은 차세대 전자소자[1] 및 최첨단 응집 물리[2,3] 등의 연구에 핵심적으로 응용되고 있습니다.

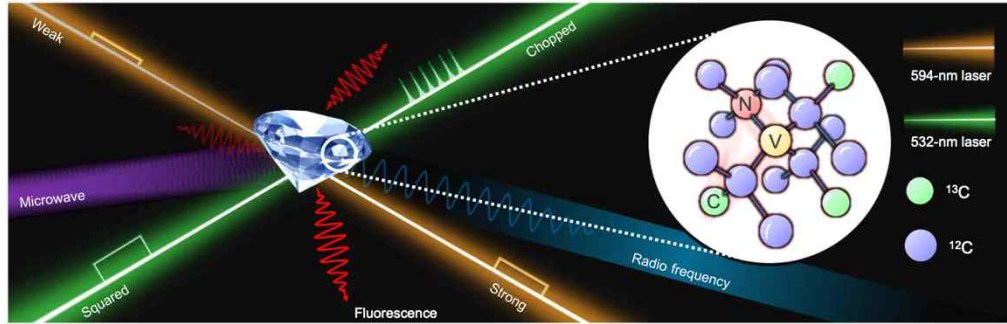


그림 1 양자 센서의 대표적인 예인 다이아몬드 질소-공공(NV) 센터의 원자 구조 삽화와 NV 센터에 내재된 우수한 다체 결맞음을 상온에서 제어 하기 위한 레이저 및 전자기파의 삽화 (image from [4])

NV 센터의 양자 시스템은 스핀의 양자적 상태로 정의된 큐비트를 이용합니다. 그림 1에 나와 있는 것처럼 NV센터는 센터의 전자 스핀과 더불어 질소 원자(N)의 핵(nuclear) 스핀과 인접 탄소 원자(^{13}C)의 핵 스핀을 가지고 있습니다. 일반적으로 스핀은 양자 축(quantization axis)에 대한 정렬 방향으로 정의되는 양자적 상태를 이용하여 기술되는데, NV 양자 시스템은 이러한 양자적 스핀 상태를 큐비트(스핀-큐비트)로 이용합니다. 특히, 앞서 언급한 NV의 여러 스핀 사이에는 강한 스핀-스핀 상호작용이 존재하고, 이를 그림 2(A)와 같이 이용하면 스핀-큐비트 사이에 양자 얽힘을 형성할 수 있습니다. 최근 이렇게 양자적으로 얽힌 NV 스핀-큐비트의 다체 결맞음을 이용해 표준양자한계 이상의 민감도[그림 2(B)]를 가진 양자 센싱이 구현되었습니다 [4].

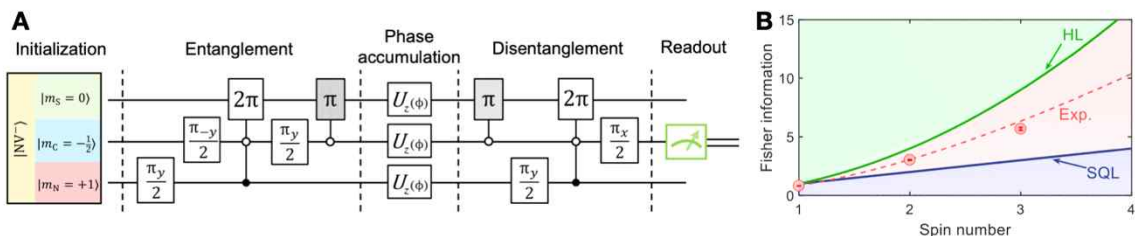


그림 2 (A) 다이아몬드 질소-공공에 내재된 여러 스핀-큐비트 사이의 양자 얽힘을 형성하고, 이를 통한 다체 결맞음 형성하여 외부 환경 변수를 측정(Phase accumulation)하는 양자 회로도. (B) 양자적으로 얽힌 스핀의 다체 결맞음을 이용한 표준양자한계 이상의 민감도 구현 (Fisher information: 센싱을 통해 측정하는 외부 환경 파라미터에 관한 정보) (image from [4])

뿐만 아니라 NV 센터의 스핀 시스템은 원자 구조적 대칭성에 기반하여 자체 정의된 양자 축을 가지고 있습니다. 이는 별도의 정밀한 광/자기장 정렬 없이도 스핀-큐비트 상태를 빛을 이용해 높은 정확도로 준비하며 측정하는 것을 가능하게 합니다. 이처럼 (i) 엄격한 환경 제어 없이 상온에서도 우수하게 제어되는 양자 특성과 (ii) NV 센터의 물리적 크기가 원자 스케일이라는 점에 착안하여, NV 센터는 기존의 광학 이미징의 회절 한계와 깊이 한계를 동시에 극복하게 해주는 양자적 비콘(beacon) [5]으로도 활용된 바 있습니다 [그림 3].

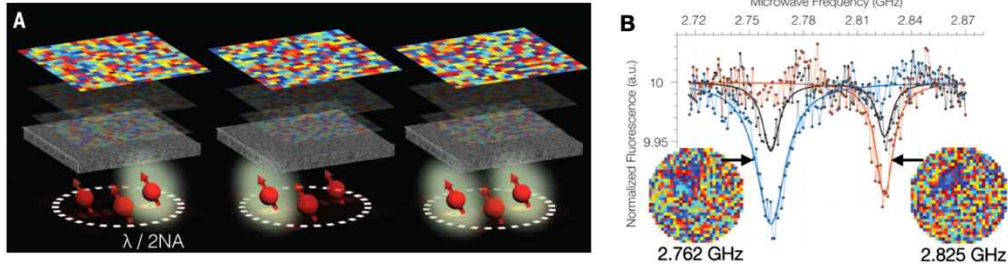


그림 3 (A) 광학적 복잡계 매질 안에서 초고해상도 광학 어드레싱을 가능하게 하는 양자 레퍼런스 비콘 (reference beacon)의 개념 삽화; 광학적 복잡계에서의 응용은 NV센터의 적용 이점을 극대화한 대표적인 예이다. (B) 광학적 초고해상도로 개별 어드레싱되는 비콘의 스핀 공명 현상(image from [5])

이처럼 실험적으로 엄격하게 제어되지 않은 환경에서도 우수하게 제어되는 NV 양자 플랫폼은 이온, 중성원자, 초전도체 플랫폼과 비교해 다양한 어플리케이션에 직접 적용될 수 있는 적용 이점(application advantage)을 지니고 있다고 볼 수 있습니다. 이러한 이점을 바탕으로 현재 NV센터를 이용한 양자 센싱은 고체물리, 응집물리, 전자물리, 바이오과학 등의 연구에 핵심적으로 응용되고 있으며, 앞으로 이러한 적용 이점을 보다 극대화 할 수 있는 다양한 광학 환경에서의 양자 센싱 및 이미징에 관한 연구 또한 기대됩니다.

[참고문헌]

- [1] Gross, I. *et al.* Real-space imaging of non-collinear antiferromagnetic order with a single-spin magnetometer. *Nature* **549**, 252–256 (2017).
- [2] Ku, M. J. H. *et al.* Imaging viscous flow of the Dirac fluid in graphene. *Nature* **583**, 537–541 (2020).
- [3] Song, T. *et al.* Direct visualization of magnetic domains and moiré magnetism in twisted 2D magnets. *Science* **374**, 1140–1144 (2021).
- [4] Xie, T. *et al.* Beating the standard quantum limit under ambient conditions with solid-state spins. *Sci. Adv.* **7**, eabg9204 (2021).
- [5] Kim, D. & Englund, D. R. Quantum reference beacon-guided superresolution optical focusing in complex media. *Science* **363**, 528–531 (2019).