

WRITER_ 이동권, 김기환, 이유한, 정주경, 박찬후, 이동훈

1

고체 점결함 기반
양자 센싱의
연구동향과 미래

이동권 고려대학교 물리학과, 석박통과정 대학원생
E-mail: lee950817@gmail.com
고려대학교 물리학과 석박사 통합과정 (2018.09~)

김기환 고려대학교 물리학과, 석박통과정 대학원생
E-mail: skskaossun@gmail.com
고려대학교 물리학과 석박사 통합과정 (2019.03~)

이유한 고려대학교 물리학과, 석박통과정 대학원생
E-mail: yuhan16713270@korea.ac.kr
고려대학교 물리학과 석박사 통합과정 (2019.09~)

정주경 고려대학교 물리학과, 석박통과정 대학원생
E-mail: dinergate@korea.ac.kr
고려대학교 물리학과 석박사 통합과정 (2021.03~)

박찬후 고려대학교 물리학과, 석박통과정 대학원생
E-mail: pch105@korea.ac.kr
고려대학교 물리학과 석박사 통합과정 (2020.03~)

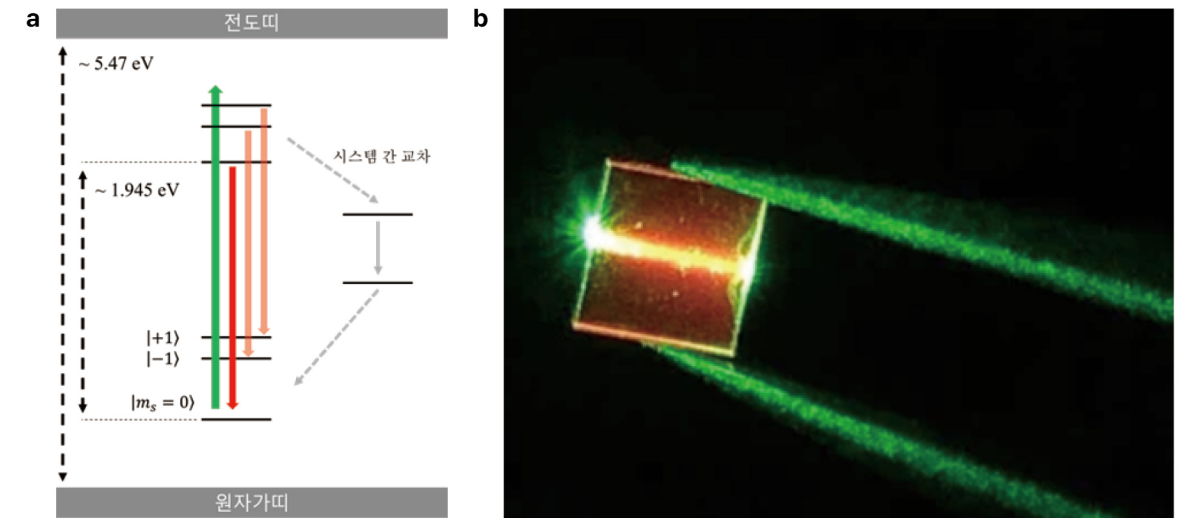
이동훈 고려대학교 물리학과, 교수
E-mail: donghun@korea.ac.kr
고려대학교 물리학과 조/부/정교수 (2016.03~현재)
미국 UCSB 연구원 (2014.08~2015.12)
미국 예일대학 박사 후 연구원 (2011.03~2014.08)
미국 오하이오주립대 물리학과 박사 졸업 (2003.09~2010.06)

1. 서론

근래의 양자 정보 기술은 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 센싱의 크게 세 가지 갈래로 구분된다. 그 중 양자 센싱은 큐비트(qubit, quantum bit의 줄임말)와 같은 양자 플랫폼을 이용하여 다양한 물리량을 정밀하게 측정하거나 양자 플랫폼 자체의 양자 상태를 측정하는데 활용되며, 고전적인 센서로는 측정할 수 없었던 많은 이점들을 가지고 있다. 다만 양자 센싱은 어떤 종류와 특성을 가진 양자 플랫폼을 측정에 사용할 것인지, 어떤 센싱 방법론을 사용할 것인지 등을 사전에 고려해야 한다. 이에 원자, 이온, 초전도체, 광자 등 여러 큐비트 양자 플랫폼이 개발되고 있지만, 그 중에서도 특히 고체 점결함 기반의 스핀 큐비트가 양자 센싱의 대표적인 플랫폼으로 주목받고 있다. 본 글에서는 고체 점결함 큐비트의 대표적인 예인 다이아몬드 질소 빈자리 결함(diamond nitrogen vacancy center, diamond NV Center)을 기반으로 양자 센싱의 연구동향과 미래 활용 방안을 소개하고자 한다. 다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자 센싱은 어떤 과정을 통해 이루어지고 있는지, 어떤 양자적 특성을 측정에 이용하는지 설명하고, 양자 센싱을 넘어 양자 이미징을 구현하는 방식, 그리고 연구 단계에서 벗어나 산업화 단계에 진입한 사례들을 소개한다.

2. 양자 센싱

다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자 센싱의 과정은 간단히 설명하자면 큐비트의 양자 상태를 원하는 상태로 초기화하고, 주변 환경 및 물리량과 상호작용으로 인해 발생한 큐비트의 양자 상태 변화를 정밀 측정하여 진동수 변화, 스핀 분포의 변화나 결맞음의 변화로부터 이를 야기하는 외부 신호 및 주변 환경을 알아내는 방식이다. 서론에서 설명했듯 초전도체 기반, 원자 기반, 광자 기반 등 많은 양자 플랫폼이 각 양자 정보 기술 분야에서 그 성능을 뽐내고 있지만, 양자 센싱 분야에서는 고체 기반 점결함이 높은 민감도와 분해능으로 인해

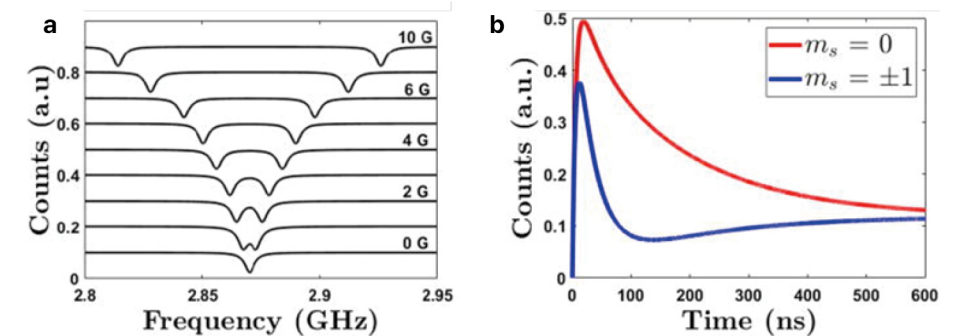


↑ [그림 1] (a) NV 센터의 에너지 준위 모식도. (b) 다이아몬드 형광 이미지. NV 센터가 충분히 많으면 육안으로도 붉은색 형광 발현을 확인할 수 있다.

그 유용함을 인정받아 대표적인 양자 센서 플랫폼으로 활용되고 있다. 특히 NV 센터는 자기장^[1-28], 변형^[29-31], 전기장^[32-34], 온도^[35-39], 압력^[40] 등의 물리량에 영향을 받기 때문에 양자 센싱 응용분야에 많이 쓰이고 있으며, 극저온이나 고압과 같은 극한 환경^[41-49]에서도 양자적 특성을 유지하기에 극한 환경에서의 센서로도 많은 관심을 받고 있다. 또한 다이아몬드 내부에 존재하는 점결함은 생화학적으로 무해하며, 생물계에도 유해한 영향을 미치지 않기에 생물학계에서의 센서로서의 활용 연구도 이루어지고 있다^[50-53].

다이아몬드 NV 센터는 고체 다이아몬드에 존재하는 점결함으로서 다이아몬드 격자 내부의 질소 결함과 빈 공간의

결함이 결합된 원자 크기의 큐비트이다. 이때 NV 센터는 스핀 양자 수(S)가 1인 양자계이며 그림 1과 같은 에너지 준위를 가지고 있다. 이 중 자기 양자 수 $m_s = \pm 1$ 상태를 자기장을 이용해 겹쳐져 있는 상태에서 분리한 뒤, 그 두 준위를 양자 상태로 이용하는 것을 자기장의 Zeeman 효과를 이용한 에너지 준위 분리 방법이라고 한다. 이렇게 구성된 양자 상태에 초록색 레이저(주로 532 nm 파장대역)를 비추주면 이를 흡수했다가 다시 여기하면서 빨간색의 빛(637 nm ~ 800 nm 파장대역)이 나오는데, 이때 양자 상태에 따라, 즉 $m_s = \pm 1$ 상태와 $m_s = 0$ 상태일 때 각각 빨간 빛의 밝기가 다르다. 그 밝기 차이를 통해 스핀 상태(즉 큐비트 상태)가 어떤 상태인지 알



↑ [그림 2] (a) 외부 자기장으로 인해 발생하는 Zeeman 상호작용에 의해 큐비트의 에너지 준위가 갈라짐. (b) 형광 신호를 읽어들이는 시간에 따른 밝기 변화. m_s 에 따라 밝기가 다른 것을 확인할 수 있다. Adapted from P. Rembold *et al.* AVS Quantum Sci. 2020; 2; 024701. Copyright © 2020, AIP Publishing^[54].

수 있다(광학적인 큐비트 상태 측정 방법). 한편 초록색 레이저를 충분한 시간 동안 비춰주면 양자 상태는 여러 과정을 거쳐 최종적으로 $m_s=0$ 상태에 머무르게 되는데, 이를 이용해 큐비트를 $m_s=0$ 상태로 초기화할 수 있다(광학적으로 큐비트 상태 초기화 방법). 여기에 더해 에너지 준위차이에 해당하는 진동수의 마이크로파를 이용하면 점결합의 양자 상태를 조작할 수 있다(상온에서 대략 3 GHz 주파수 대역의 마이크로파 제어 방법).

NV 센터의 양자 상태는 상태 분포, 위상 차이, 결맞음 등의 양자적 특성을 가지는데, 이 중 상태분포를 이용한 측정 중의 한 예는 전자 스핀 공명(electron spin resonance)이다. 이는 Zeeman 상호작용으로 인해 NV 센터의 에너지 준위는 자기장에 의해 변화할 때 전자 스핀 공명법을 이용하여 NV 센터의 에너지 준위를 측정해 자기장을 역산하는 방식이다. 에너지 준위 측정은 이렇게 자기장을 측정하는 목적 외에도 더 복잡하고 민감한 측정 프로토콜을 위해 사용되며, 이때 전자 스핀 공명법은 일반적으로 가장 널리 쓰인다. 전자 스핀 공명법은 다른 측정법들에 비해 간단하고 측정시간이 오래 걸리지 않는다는 장점으로 인해 여러 지점에서의 측정값을 알아내야 하는 양자 이미징 분야에서 주로 활용된다.

큐비트의 위상 차이를 측정하는 방식은 고전적인 물리 법칙에서는 존재하지 않는 양자적인 특성을 이용하는 방식이다. 먼저 초기화된 상태의 큐비트를 외부 자기장과 상호작용하여 위상 차이를 얻을 수 있도록 중첩 상태로 만들고, 특정 시간 동안 위상 차이를 얻은 큐비트의 양자 상태를 읽을 수 있는 큐비트 상태로 바꾸어 상태분포를 측정한다. 이때 중첩된 양자 상태가 자기장과 상호작용하는 동안 마이크로파 펄스를 통해 큐비트를 조작해줌으로써 시간에 따라 변화하는 교류 신호의 고유 진동수에서 자기장을 더 민감하게 측정할 수도 있다.

마지막으로 결맞음을 이용한 양자 상태 측정 방식은 종축 이완 시간(longitudinal relaxation time, T_1)과 횡축 이완 시간(transverse relaxation time, T_2)을 이용하는 것이다. T_1 감쇠는 주위 환경이 에너지 준위에 영향을 주는 것이고, T_2 감쇠는 주위 환경이 위상에 영향을 주는 것이다. 양자 센싱은 큐비트가 양자정보를 잃기 전에, 즉 결맞음 시간 내에 측정을 마쳐야 한다. 이런 시간적 제약은 양자 센싱 신호의 주파수

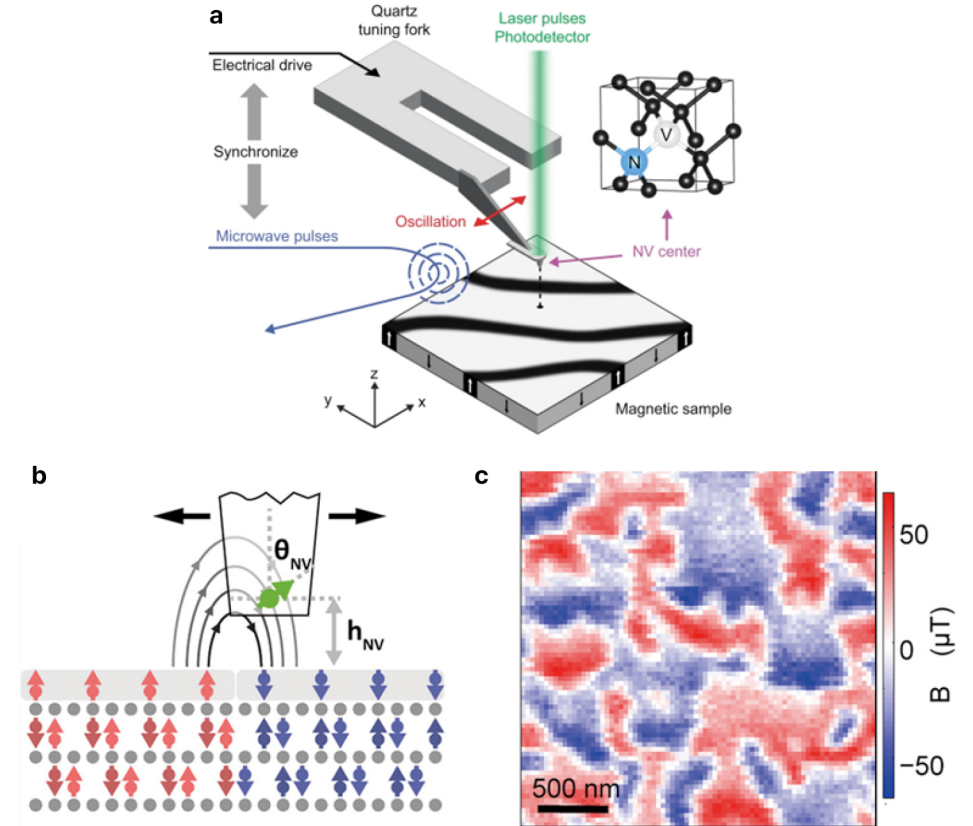
분해능과 연관되며, 따라서 결맞음 시간이 길 수록 주파수 분해능은 높아진다.

양자 센싱은 고전적인 센싱 방법과 비교해 복잡한 고려사항이 많다. 그럼에도 불구하고 양자 센싱을 사용해야 하는 이유는 고전적인 수단으로는 얻을 수 없는 양자 이득이 있기 때문이다. 대표적인 양자 이득의 예시로, 고전 센싱에서는 측정할 수 있는 최소 센싱 신호의 크기가 센서의 개수의 제곱근($\sqrt{N}$)에 비례해 작아지는데 반해 양자 센싱에서는 측정할 수 있는 최소 센싱 신호의 크기가 센서의 개수(N)에 비례해 작아진다. 즉 양자 센서를 이용하면 이론적으로 $\sqrt{N}$ 배만큼의 이득을 얻을 수 있기 때문에, 고전 센서로는 측정할 수 없는 미세신호를 측정할 수 있다. 또한 고전적인 방식으로는 실현할 수 없는 양자얽힘이나 양자압축이라는 방법을 양자센싱에 활용할 수도 있다. 예를 들면 여러 개의 큐비트를 양자얽힘을 이용하여 얽히게 한 뒤 멀리 떨어진 센서들 사이의 상관관계를 활용할 수도 있고, 측정신호에 민감한 큐비트(센싱 큐비트)와 결맞음 시간이 긴 큐비트(양자메모리 큐비트)를 양자얽힘으로 엮은 뒤 각 큐비트의 유리한 특성만을 골라 사용하는 하이브리드형 양자 센서도 만들어 낼 수 있다.

3. 양자 이미징

실생활에서는 측정하고자 하는 신호의 공간분포를 시각화하는 것이 더 많은 정보를 제공하는 경우가 대다수이다. 예를 들어 의료 분야에서 암 세포나 바이러스를 확인하기 위한 이미징이나, 전기전자 산업 분야에서 미세한 회로의 전류 흐름을 검사하기 위해 수행하는 이미징 모두 측정하고자 하는 신호의 공간분포를 확인하는 것이다. 최근에는 앞서 언급한 양자 센싱을 자기장 이미징에 활용함으로써 미세한 자기장 신호를 높은 공간분해능으로 이미징하기 위한 여러 연구들이 진행되고 있다.

양자 자기장 이미징은 측정하려는 대상 또는 목적에 따라 그에 알맞은 공간분해능 및 측정 방식을 사용해야 한다. 예를 들어 자성물질에서 스핀들의 상호작용을 측정하기 위해서는



↑ [그림 3] (a) AFM 프로브와 결합된 NV 센터의 모식도. Adapted from W. S. Huxter *et al.* Nat. Commun. 2022; 13; 3761. Copyright © 2022, W. S. Huxter *et al.* [59]. 스캐닝 방식으로 자성물질의 도메인 주변의 자기장을 측정하는 (b) 그림과 (c) 해당 방식으로 측정한 자기장의 분포. Adapted from P. Appel *et al.* Nano Lett. 2019; 19; 1682-1687. Copyright © 2019, American Chemical Society [60].

나노미터 단위의 공간분해능이 필요하고 [55-58], 생물계에서 일어나는 자기적 상호작용을 측정하기 위해서는 공간분해능이 높은 방법보다는 넓은 영역을 빠르게 이미징 가능하면서 측정하고자 하는 유기물 샘플에 문제를 일으키지 않는 방법이 필요하다.

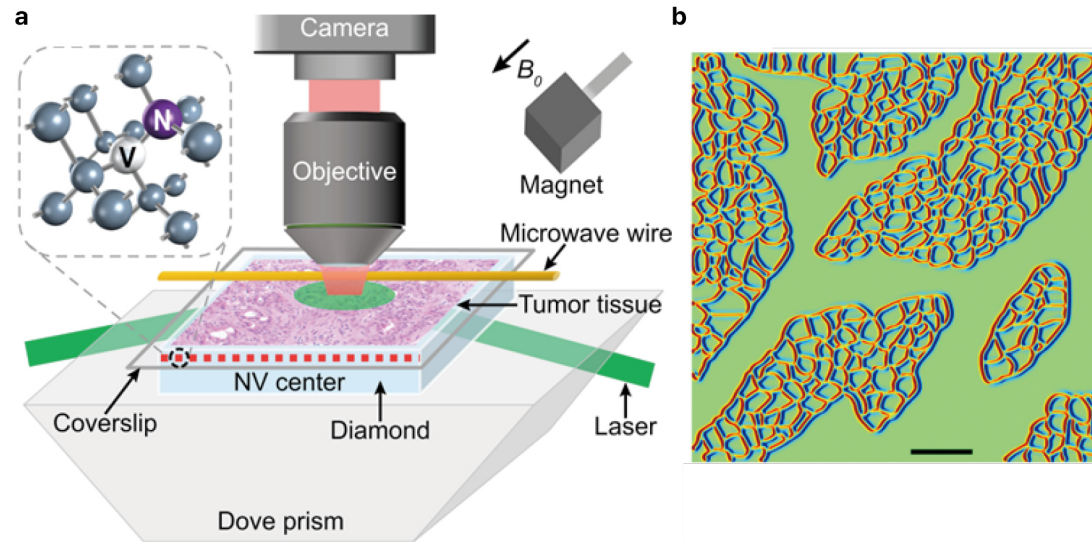
3.1. 스캐닝 프로브를 이용한 나노미터 양자 자기장 이미징

나노미터 단위의 분해능을 가진 방법으로는 스캐닝 프로브를 이용하는 방식이 있다. 원자힘현미경(atomic force microscope, AFM) 방식의 스캐닝 프로브를 이용하면 측정 대상에 매우 근접할 수 있고, 위치를 정교하게 조절할 수 있다. 여기에 NV 센터의 자기장 측정을 결합하면 다른 측정법을 이용했을 때 볼 수 없었던 국소적인 자기적 현상들을 이미징하는 것이 가능하므로 기존에는 알 수 없었던 물리현상을

알아낼 수 있다. 최근에는 자기장 민감도를 더욱 증가시키기 위해 AFM 프로브에 주기적인 진동을 주어 정적인 자기장을 교류신호로 만들으로써 NV 센터가 가지고 있는 여러 교류 신호 센싱 프로토콜을 이용하는 방식도 연구되고 있다. NV 센터는 측정 신호를 빛 형태로 발하기 때문에 NV 센터와 결합된 AFM 프로브의 광효율성이 측정의 효율성에 큰 영향을 미친다. 따라서 AFM 프로브에 결합된 NV 센터를 어떤 구조체로 만들어야 광효율성을 개선할 수 있는지에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

3.2. 대면적 현미경 시스템을 이용한 양자 자기장 이미징

스캐닝 프로브 방식은 공간 분해능이 높지만, 측정 영역이 작고 스캐닝에 상대적으로 시간이 오래 소요된다. 이에 반해 카메라를 활용하여 넓게 분포된 NV 센터의 형광 신호를



↑ [그림 4] (a) NV 센터를 이용해 생체 조직을 이미징하는 예시. 자기 나노 입자(magnetic nano particle, MNP)를 단백질에 붙이고 세포막에서 단백질의 분포를 이미징한 그림. Adapted from S. Chen *et al.* PNAS 2022; 119; e2118876119. Copyright © 2022, S. Chen *et al.* [61].

동시다발적으로 이미지화하면 측정 시간 면에서 스캐닝 프로브 방식보다 이점이 크다. 따라서 측정하고자 하는 샘플의 크기가 클 경우, 혹은 측정 대상의 물성이 빠르게 변화하는 경우에는 스캐닝 프로브 방식보다 대면적 현미경 시스템을 활용한 대면적 양자 자기장 이미징 방법이 효과적이다. 또한 다이아몬드 자체가 생물에 무해하고, 대면적 현미경을 활용하면 세포 혹은 단백질의 변성이 이뤄지기 전 빠른 측정이 가능하기 때문에 바이오, 의료 분야 연구에 적합하다. 대표적 예시로 자기주성 박테리아(magnetotactic bacteria) [51]나 특정 생물의 치아 [62]에서의 자기특성을 이미징하는 데에 대면적 양자 자기장 이미징 기술이 활용되었다. 한편 자성을 띠는 생화학 물질 외에도 DNA나 종양 세포와 같은 비자기장 물질들의 구조나 활성을 연구하기 위해 측정 대상에 자기장을 가진 표지를 붙여 측정하기도 한다 [61, 63].

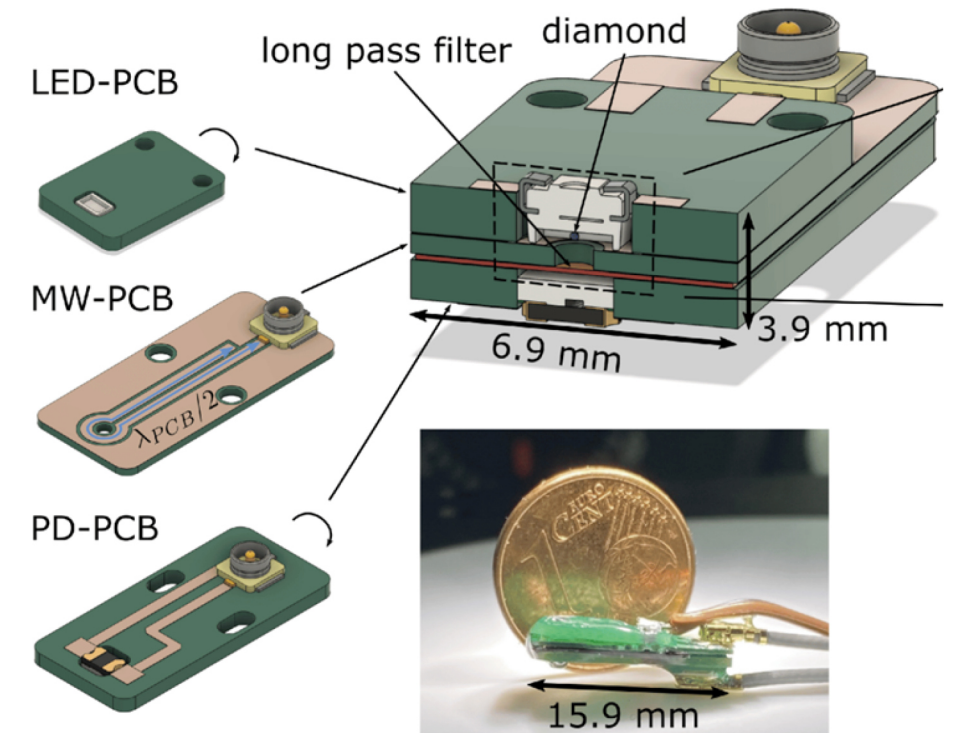
4. 연구소 밖으로...

4.1. 휴대용 양자센서 제작

앞서 다룬 바와 같이 양자센서는 과학 연구의 최전선에서

다양한 분야에 연구 및 사용되고 있다. 그런 한편 실사용되고 있는 센서를 양자 센서로 대체하기 위한 연구들도 병행 중이다. 앞서 소개한 많은 연구들은 NV 센터의 양자적 특성을 유지하기 위해 주로 단일 NV 센터를 센서로 이용했다. 하지만 실생활에서의 활용을 위해서는 큰 신호를 단시간에 얻어야 하며, 센서를 여기저기 가지고 다니며 측정할 수 있는 휴대성을 갖추는 것도 중요하다. 이러한 실사용 조건을 만족시키기 위해 단일 NV 센터가 아닌 여러 개의 NV 센터를 하나의 양자 센서로 사용하는 방법이 제시되었다(양상블 NV 센터 기반 양자센서). 양상블 NV 센터 기반 양자 센서는 NV 센터 기반의 실용 양자센서를 구현하기 위해 NV 센터를 포함한 다이아몬드, NV 센터에 빛을 비춰줄 광원, NV 센터에서 나오는 빛을 읽기 위한 검출부, 여러 NV 센터를 효과적으로 제어할 수 있는 마이크로파 제어부 등으로 구성된다.

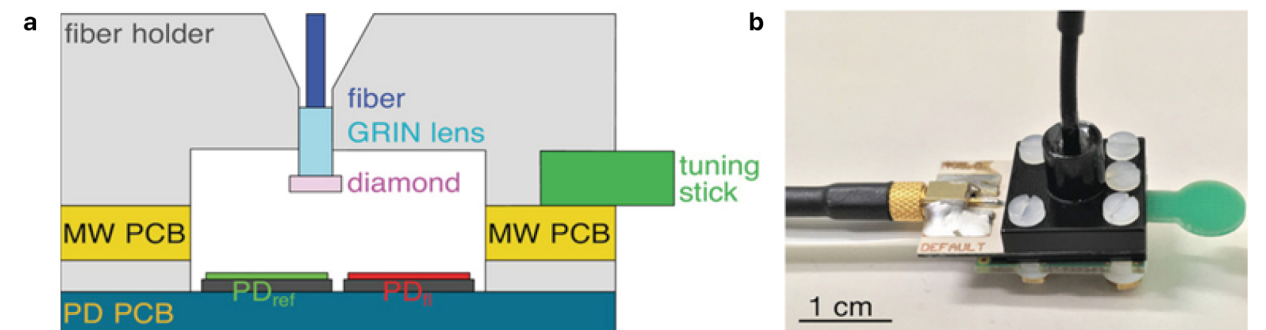
그림 5는 동전 크기의 공간에 다이아몬드, LED, 그리고 포토 다이오드가 포함되어 있는 소형 양자 자기장 센서의 예시이다. 이 소형 양자 자기장 센서를 이용하면 1ms의 측정 시간 동안 최대 1 μ T 수준의 작은 자기장을 측정할 수 있다 [65]. 한편 소형 센서를 만들 때 발생할 수 있는 여러 문제들이 있는데, 발열에 의한 문제가 가장 대표적이다. 내부 구성 요소들이 작동하며 발생하는 열로 인해 장치 내부의 온도가



↑ [그림 5] 양상블 NV 센터를 이용한 소형 양자자기장 센서. Adapted from J. Pogorzelski *et al.* Sensors 2024; 24; 743. Copyright © 2024, J. Pogorzelski *et al.* [64].

오르면 NV 센터의 공명진동수가 변화하므로 측정 결과가 부정확해지기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해 냉각 요소를 장치에 추가하는 방법도 있지만, 온도를 안정시키는 반도체 부로 센서의 크기가 커지면 휴대성이 중요한 실용 분야에서의 평가가 낮아진다. 발열 문제를 해결하기 위한 다른 방법으로는 광섬유를 통해 빛을 비춰주는 방식이 있는데, 그림 6과 같이 빛을 광섬유를 통해 전달하면 광원에서 생기는 발열

문제를 피할 수 있다. 이에 더해 빛의 수신부에 balanced detection 방식을 적용해 NV 센터에 비추는 초록빛의 잡음을 없애면 자기장 민감도가 344 pT Hz^{-1/2}까지 도달할 수 있다 [66]. 이와 같이 최근의 연구들은 센서 동작에 필요한 모든 구성요소들을 패키징해서 휴대성을 높이는 것에 주목하고 있다 [67].



↑ [그림 6] (a) 광섬유를 이용한 소형 양자 자기장 센서의 모식도, (b) 실제 사진. Adapted from F.M. Stürmer *et al.* Adv. Quantum Technol. 2021; 4; 2000111. Copyright © 2021, F. M. Stürmer *et al.* Advanced Quantum Technologies published by Wiley-VCH GmbH [66].

4.2. 양자 센서의 산업화

양자 센서의 개발은 연구 단계를 넘어 사업화 단계까지 도달하고 있다. 예를 들어 스위스 QZabre 사의 quantum scanning microscope (QSM)은 높은 공간 분해능을 가지고 있으며 스캐닝 프로브 방식을 기반으로 자기장 분포를 이미징할 수 있는 시스템으로서 이미 상용화되어 판매 중이고, 국소적인 자기장의 상호작용 연구에 국내외 연구진에게 널리 이용되고 있다. 다른 예시로 미국의 Quantum Diamond Technologies 사(QDTI Inc.)는 환자에게서 채취한 시료에 바이오 마커를 붙여 미세 자기장을 이미징함으로써 질병이나 바이러스의 초기진단 장치로 활용할 수 있는 대면적 양자자기장 이미징 제품을 시장에 선보였다. 이 제품은 1 mm² 영역의 단백질 검사를 1시간 내로 마칠 수 있는데, 이는 시중에 존재하는 다른 방식에 비해 훨씬 빠른 것으로서 양자센서가 제품화, 산업화되었을 때 경쟁력이 있음을 보여준다.

5. 맺음말

본 글에서는 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자 센싱과 이미징, 그리고 연구 단계를 넘어 산업 단계로 진입한 양자센서들에 대해서 살펴보았다. NV 센터는 실온에서도 양자 상태를 유지할 수 있어 양자 센서 응용분야에 각광받고 있는 대표적인 플랫폼으로서 최근의 연구경향은 센서의 측정 분해능과 민감도를 향상시키고, 소형화하여 휴대성을 높일 수 있는 방향으로 진행되고 있다. 여전히 많은 연구들이 연구실 차원의 시제품 제작 단계에 머무르고 있지만, 향후 양자 센싱 연구들이 활발히 진행되어 제품화, 산업화됨으로써 실생활에 유용하게 활용될 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

1 J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. Gurudev Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, "Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond," *Nature* **455**, 644-647 (2008).

2 L. Rondin, J.-P. Tetienne, S. Rohart, A. Thiaville, T. Hingant, P. Spinicelli, J.-F. Roch, and V. Jacques, "Stray-field imaging of magnetic vortices with a single diamond spin," *Nat. Commun.* **4**, 2279 (2013).

3 J.-P. Tetienne, T. Hingant, J.-V. Kim, L. Herrera Diez, J.-P. Adam, K. Garcia, J.-F. Roch, S. Rohart, A. Thiaville, D. Rav-elosona, and V. Jacques, "Nanoscale imaging and control of domain- wall hopping with a nitrogen- vacancy center microscope," *Science* **344**, 1366-1369 (2014).

4 M. Pelliccione, A. Jenkins, P. Ovartchaiyapong, C. Reetz, E. Emmanouilidou, N. Ni, and A. C. B. Jayich, "Scanned probe imaging of nanoscale magnetism at cryogenic temperatures with a single-spin quantum sensor," *Nat. Nanotechnol.* **11**, 700-705 (2016).

5 L. Thiel, D. Rohner, M. Ganzhorn, P. Appel, E. Neu, B. Müller, R. Kleiner, D. Koelle, and P. Maletinsky, "Quantitative nanoscale vortex imaging using a cryogenic quantum magnetometer," *Nat. Nanotechnol.* **11**, 677-681 (2016).

6 B. J. Maertz, A. P. Wijnheijmer, G. D. Fuchs, M. E. Nowakowski, and D. D. Awschalom, "Vector magnetic field microscopy using nitrogen vacancy centers in diamond," *Appl. Phys. Lett.* **96**, 092504 (2010).

7 J. D. A. Wood, J.-P. Tetienne, D. A. Broadway, L. T. Hall, D. A. Simpson, A. Stacey, and L. C. L. Hollenberg, "Microwave-free nuclear magnetic resonance at molecular scales," *Nat. Commun.* **8**, 15950 (2017).

8 L. M. Pham, D. Le Sage, P. L. Stanwix, T. K. Yeung, D. Glenn, A. Trifonov, P. Cappellaro, P. R. Hemmer, M. D. Lukin, H. Park, A. Yacoby, and R. L. Walsworth, "Magnetic field imaging with nitrogen-vacancy ensembles," *New J. Phys.* **13**, 045021 (2011).

9 G. Wang, Y.-X. Liu, Y. Zhu, and P. Cappellaro, "Nanoscale vector AC magnetometry with a single nitrogen-vacancy center in diamond," *Nano Lett.* **21**, 5143-5150 (2021).

10 N. Zhao, J.-L. Hu, S.-W. Ho, J. T. K. Wan, and R. B. Liu, "Atomic-scale magnetometry of distant nuclear spin clusters via nitrogen-vacancy spin in diamond," *Nat. Nanotechnol.* **6**, 242-246 (2011).

11 N. Zhao, J. Honert, B. Schmid, M. Klas, J. Isoya, M. Markham, D. Twitchen, F. Jelezko, R.-B. Liu, H. Fedder, and J. Wrachtrup, "Sensing single remote nuclear spins," *Nat. Nanotechnol.* **7**, 657-662 (2012).

12 T. H. Taminiau, J. J. T. Wagenaar, T. van der Sar, F. Jelezko, V. V. Dobrovitski, and R. Hanson, "Detection and control of individual nuclear spins using a weakly coupled electron spin," *Phys. Rev. Lett.* **109**, 137602 (2012).

13 M. Loretz, S. Pezzagna, J. Meijer, and C. L. Degen, "Nanoscale nuclear magnetic resonance with a 1.9-nm-deep nitrogen-vacancy sensor," *Appl. Phys. Lett.* **104**, 033102 (2014).

14 A. O. Sushkov, I. Lovchinsky, N. Chisholm, R. L. Walsworth, H. Park, and M. D. Lukin, "Magnetic resonance detection of individual proton spins using quantum reporters," *Phys. Rev. Lett.* **113**, 197601 (2014).

15 S. J. DeVience, L. M. Pham, I. Lovchinsky, A. O. Sushkov, N. Bar-Gill, C. Belthangady, F. Casola, M. Corbett, H. Zhang, M. Lukin, H. Park, A. Yacoby, and R. L. Walsworth, "Nanoscale NMR spectroscopy and imaging of multiple nuclear species," *Nat. Nanotechnol.* **10**, 129-134 (2015).

16 D. Rugar, H. J. Mamin, M. H. Sherwood, M. Kim, C. T. Rettner, K. Ohno, and D. D. Awschalom, "Proton magnetic resonance imaging using a nitrogen-vacancy spin sensor," *Nat. Nanotechnol.* **10**, 120-124 (2015).

17 P. Kehayias, A. Jarmola, N. Mosavian, I. Fescenko, F. M. Benito, A. Laraoui, J. Smits, L. Bougas, D. Budker, A. Neumann, S. R. J. Brueck, and V. M. Acosta, "Solution nuclear magnetic resonance spectroscopy on a nanostructured diamond chip," *Nat. Commun.* **8**, 188 (2017).

18 D. R. Glenn, D. B. Bucher, J. Lee, M. D. Lukin, H. Park, and R. L. Walsworth, "High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor," *Nature* **555**, 351-354 (2018).

19 R. D. Allert, K. D. Briegel, and D. B. Bucher, "Advances in nano- and microscale NMR spectroscopy using diamond quantum sensors," *Chem. Commun.* **58**, 8165-8181 (2022).

20 A. Laraoui, F. Dolde, C. Burk, F. Reinhard, J. Wrachtrup, and C. A. Meriles, "High-resolution correlation spectroscopy of ¹³C spins near a nitrogen-vacancy centre in diamond," *Nat. Commun.* **4**, 1651 (2013).

21 H. J. Mamin, M. Kim, M. H. Sherwood, C. T. Rettner, K. Ohno, D. D. Awschalom, and D. Rugar, "Nanoscale nuclear magnetic resonance with a nitrogen-vacancy spin sensor," *Science* **339**, 557-560 (2013).

22 L. M. Pham, S. J. DeVience, F. Casola, I. Lovchinsky, A. O. Sushkov, E. Bersin, J. Lee, E. Urbach, P. Cappellaro, H. Park, A. Yacoby, M. Lukin, and R. L. Walsworth, "NMR technique for determining the depth of shallow nitrogen-vacancy centers in diamond," *Phys. Rev. B* **93**, 045425 (2016).

23 I. Lovchinsky, A. O. Sushkov, E. Urbach, N. P. de Leon, S. Choi, K. De Greve, R. Evans, R. Gertner, E. Bersin, C. Müller, L. McGuinness, F. Jelezko, R. L. Walsworth, H. Park, and M. D. Lukin, "Nuclear magnetic resonance detection and spectroscopy of single proteins using quantum logic," *Science* **351**, 836-841 (2016).

24 T. Staudacher, F. Shi, S. Pezzagna, J. Meijer, J. Du, C. A. Meriles, F. Reinhard, and J. Wrachtrup, "Nuclear magnetic resonance spectroscopy on a (5-nanometer)³ sample volume," *Science* **339**, 561-563 (2013).

25 T. Staudacher, N. Raatz, S. Pezzagna, J. Meijer, F. Reinhard, C. A. Meriles, and J. Wrachtrup, "Probing molecular dynamics at the nanoscale via an individual paramagnetic centre," *Nat. Commun.* **6**, 8527 (2015).

26 F. Shi, Q. Zhang, P. Wang, H. Sun, J. Wang, X. Rong, M. Chen, C. Ju, F. Reinhard, H. Chen, J. Wrachtrup, J. Wang, and J. Du, "Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions," *Science* **347**, 1135-1138 (2015).

27

K. S. Liu, A. Henning, M. W. Heindl, R. D. Allert, J. D. Bartl, I. D. Sharp, R. Rizzato, and D. B. Bucher, "Surface NMR using quantum sensors in diamond," *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **119**, e2111607119 (2022).

28

S. Kolkowitz, Q. P. Unterreithmeier, S. D. Bennett, and M. D. Lukin, "Sensing distant nuclear spins with a single electron spin," *Phys. Rev. Lett.* **109**, 137601 (2012).

29

M. S. J. Barson, P. Peddibhotla, P. Ovartchaiyapong, K. Ganesan, R. L. Taylor, M. Gebert, Z. Mielens, B. Koslowski, D. A. Simpson, L. P. McGuinness, J. McCallum, S. Prawer, S. Onoda, T. Ohshima, A. C. B. Jayich, F. Jelezko, N. B. Manson, and M. W. Doherty, "Nanomechanical sensing using spins in diamond," *Nano Lett.* **17**, 1496-1503 (2017).

30

P. Ovartchaiyapong, K. W. Lee, B. A. Myers, and A. C. B. Jayich, "Dynamic strain-mediated coupling of a single diamond spin to a mechanical resonator," *Nat. Commun.* **5**, 4429 (2014).

31

S. Kolkowitz, A. C. B. Jayich, Q. P. Unterreithmeier, S. D. Bennett, P. Rabl, J. G. E. Harris, and M. D. Lukin, "Coherent sensing of a mechanical resonator with a single-spin qubit," *Science* **335**, 1603-1606 (2012).

32

F. Dolde, H. Fedder, M. W. Doherty, T. Nöbauer, F. Rempp, G. Balasubramanian, T. Wolf, F. Reinhard, L. C. L. Hollenberg, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, "Electric-field sensing using single diamond spins," *Nat. Phys.* **7**, 459-463 (2011).

33

F. Dolde1, M. W. Doherty, J. Michl, I. Jakobi, B. Naydenov, S. Pezzagna, J. Meijer, P. Neumann, F. Jelezko, N. B. Manson, and J. Wrachtrup, "Nanoscale detection of a single fundamental charge in ambient conditions using the NV- center in diamond," *Phys. Rev. Lett.* **112**, 097603 (2014).

34

A. Ariyaratne, D. Bluvstein, B. A. Myers, and A. C. B. Jayich, "Nanoscale electrical conductivity imaging using a nitrogen-vacancy center in diamond," *Nat. Commun.* **9**, 2406 (2018).

35

P. Neumann, I. Jakobi, F. Dolde, C. Burk, R. Reuter, G. Waldherr, J. Honert, T. Wolf, A. Brunner, J. H. Shim, D. Suter, H. Sumiya, J. Isoya, and J. Wrachtrup, "High-precision nanoscale temperature sensing using single defects in diamond," *Nano Lett.* **13**, 2738-2742 (2013).

36

V. M. Acosta, E. Bauch, M. P. Ledbetter, A. Waxman, L.-S. Bouchard, and D. Budker, "Temperature dependence of the nitrogen-vacancy magnetic resonance in diamond," *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070801 (2010).

37

G. Kucsko, P. C. Maurer, N. Y. Yao, M. Kubo, H. J. Noh, P. K. Lo, H. Park, and M. D. Lukin, "Nanometre-scale thermometry in a living cell," *Nature* **500**, 54-58 (2013).

38

M. W. Doherty, V. M. Acosta, A. Jarmola, M. S. J. Barson, N. B. Manson, D. Budker, and L. C. L. Hollenberg, "Temperature shifts of the resonances of the NV⁻ center in diamond," *Phys. Rev. B* **90**, 041201(R) (2014).

39

M. Fujiwara, S. Sun, A. Dohms, Y. Nishimura, K. Suto, Y. Takezawa, K. Oshimi, L. Zhao, N. Sadzak, Y. Umehara, Y. Teki, N. Komatsu, O. Benson, Y. Shikano, and E. Kage-Nakadai, "Real-time nanodiamond thermometry probing *in vivo* thermogenic responses," *Sci. Adv.* **6**, 9 (2020).

40

M. W. Doherty, V. V. Struzhkin, D. A. Simpson, L. P. McGuinness, Y. Meng, A. Stacey, T. J. Karle, R. J. Hemley, N. B. Manson, L. C. L. Hollenberg, and S. Prawer, "Electronic properties and metrology applications of the diamond NV- center under pressure," *Phys. Rev. Lett.* **112**, 047601 (2014).

41

G.-Q. Liu, X. Feng, N. Wang, Q. Li, and R.-B. Liu, "Coherent quantum control of nitrogen-vacancy center spins near 1000 kelvin," *Nat. Commun.* **10**, 1344 (2019).

42

D. M. Toyli, D. J. Christle, A. Alkauskas, B. B. Buckley, C. G. Van de Walle, and D. D. Awschalom, "Measurement and control of single nitrogen-vacancy center spins above 600 K," *Phys. Rev. X* **2**, 031001 (2012).

43

J. Happacher, J. Bocquel, H. T. Dinani, M. A. Tschudin, P. Reiser, D. A. Broadway, J. R. Maze, and P. Maletinsky, "Temperature-dependent photophysics of single NV centers in diamond," *Phys. Rev. Lett.* **131**, 086904 (2023).

44

P. J. Scheidegger, S. Diesch, M. L. Palm, and C. L. Degen, "Scanning nitrogen-vacancy magnetometry down to 350 mK," *Appl. Phys. Lett.* **120**, 224001 (2022).

45

S. Hsieh, P. Bhattacharyya, C. Zu, T. Mittiga, T. J. Smart, F. Machado, B. Kobrin, T. O. Höhn, N. Z. Rui, M. Kamrani, S. Chatterjee, S. Choi, M. Zaletel, V. V. Struzhkin, J. E. Moore, V. I. Levitas, R. Jeanloz, and N. Y. Yao, "Imaging stress and magnetism at high pressures using a nanoscale quantum sensor," *Science* **366**, 1349-1354 (2019).

46

A. Hilberer, L. Toraille, C. Dailledouze, M.-P. Adam, L. Hanlon, G. Weck, M. Schmidt, P. Loubeyre, and J.-F. Roch, "Enabling quantum sensing under extreme pressure: Nitrogen-vacancy magnetometry up to 130 GPa," *Phys. Rev. B* **107**, L220102 (2023).

47

M. Wang, Y. Wang, Z. Liu, G. Xu, B. Yang, P. Yu, H. Sun, X. Ye, J. Zhou, A. F. Goncharov, Y. Wang, and J. Du, "Imaging magnetic transition of magnetite to megabar pressures using quantum sensors in diamond anvil cell," *Nat. Commun.* **15**, 8843 (2024).

48

P. Bhattacharyya, W. Chen, X. Huang, S. Chatterjee, B. Huang, B. Kobrin, Y. Lyu, T. J. Smart, M. Block, E. Wang, Z. Wang, W. Wu, S. Hsieh, H. Ma, S. Mandyam, B. Chen, E. Davis, Z. M. Geballe, C. Zu, V. Struzhkin, R. Jeanloz, J. E. Moore, T. Cui, G. Galli, B. I. Halperin, C. R. Laumann, and N. Y. Yao, "Imaging the Meissner effect in hydride superconductors using quantum sensors," *Nature* **627**, 73-79 (2024).

49

M. Lesik, T. Plisson, L. Toraille, J. Renaud, F. Occelli, M. Schmidt, O. Salord, A. Delobbe, T. Debuisschert, L. Rondin, P. Loubeyre, and J.-F. Roch, "Magnetic measurements on micrometer-sized samples under high pressure using designed NV centers," *Science* **366**, 1359-1362 (2019).

50

N. Aslam, H. Zhou, E. K. Urbach, M. J. Turner, R. L. Walsworth, M. D. Lukin, and H. Park, "Quantum sensors for biomedical applications," *Nat. Rev. Phys.* **5**, 157-169 (2023).

51

D. Le Sage, K. Arai, D. R. Glenn, S. J. DeVience, L. M. Pham, L. Rahn-Lee, M. D. Lukin, A. Yacoby, A. Komeili, and R. L. Walsworth, "Optical magnetic imaging of living cells," *Nature* **496**, 486-489 (2013).

52

J. F. Barry, M. J. Turner, J. M. Schloss, D. R. Glenn, Y. Song, M. D. Lukin, H. Park, and R. L. Walsworth, "Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond," *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **113**, 14133-14138 (2016).

53

K. Arai, A. Kuwahata, D. Nishitani, I. Fujisaki, R. Matsuki, Y. Nishio, Z. Xin, X. Cao, Y. Hatano, S. Onoda, C. Shinei, M. Miyakawa, T. Taniguchi, M. Yamazaki, T. Teraji, T. Ohshima, M. Hatano, M. Sekino, and T. Iwasaki, "Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy," *Commun. Phys.* **5**, 200 (2022).

54

P. Rembold, N. Oshnik, M. M. Müller, S. Montangero, T. Carlarco, and E. Neu, "Introduction to quantum optimal control for quantum sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond," *AVS Quantum Sci.* **2**, 024701 (2020).

55

T. X. Zhou, J. J. Carmiggelt, L. M. Gächter, I. Esterlis, D. Sels, R. J. Stöhr, C. Du, D. Fernandez, J. F. Rodriguez-Nieva, F. Büttner, E. Demler, and A. Yacoby, "A magnon scattering platform," *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **118**, e2019473118 (2021).

56

B. G. Simon, S. Kurdi, H. La, I. Bertelli, J. J. Carmiggelt, M. Rufs, N. de Jong, H. van den Berg, A. J. Katan, and T. van der Sar, "Directional excitation of a high-density magnon gas using coherently driven spin waves," *Nano Lett.* **21**, 8213-8219 (2021).

57

B. G. Simon, S. Kurdi, J. J. Carmiggelt, M. Borst, A. J. Katan, and T. van der Sar, "Filtering and imaging of frequency-degenerate spin waves using nanopositioning of a single-spin sensor," *Nano Lett.* **22**, 9198-9204 (2022).

58

F. Casola, T. van der Sar, and A. Yacoby, "Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond," *Nat. Rev. Mater.* **3**, 17088 (2018).

59

W. S. Huxter, M. L. Palm, M. L. Davis, P. Welter, C.-H. Lambert, M. Trassin, and C. L. Degen, "Scanning gradiometry with a single spin quantum magnetometer," *Nat. Commun.* **13**, 3761 (2022).

60

P. Appel, B. J. Shields, T. Kosub, N. Hedrich, R. Hübner, J. Faßbender, D. Makarov, and P. Maletinsky, "Nanomagnetism of magnetoelectric granular thin-film antiferromagnets," *Nano Lett.* **19**, 1682-1687 (2019).

61

S. Chen, W. Li, X. Zheng, P. Yu, P. Wang, Z. Sun, Y. Xu, D. Jiao, X. Ye, M. Cai, M. Shen, M. Wang, Q. Zhang, F. Kong, Y. Wang, J. He, H. Wei, F. Shi, and J. Du, "Immunomagnetic microscopy of tumor tissues using quantum sensors in diamond," *Proc. Nat. Acad. Sci.* **119**, e2118876119 (2022).

62 J. M. McCoe, M. Matsuoka, R. W. de Gille, L. T. Hall, J. A. Shaw, J.-P. Tetienne, D. Kisailus, L. C. L. Hollenberg, and D. A. Simpson, "Quantum magnetic imaging of iron biomineralization in teeth of the chiton *Acanthopleura hirtosa*," Small Methods **4** (2020).

63 Z. Kazi, I. M. Shelby, R. Nirodi, J. Turnbull, H. Watanabe, K. M. Itoh, P. A. Wiggins, and K.-M. C. Fu, "Direct measure of DNA bending by quantum magnetic imaging of a nano-mechanical torque-balance," arXiv:2402.17964 (2024).

64 J. Pogorzelski, L. Horsthemke, J. Homrighausen, D. Stiegekött, M. Gregor, and P. Glösekötter, "Compact and fully integrated LED quantum sensor based on NV centers in diamond," Sensors **24**, 743 (2024).

65 F. M. Stürner, A. Brenneis, J. Kassel, U. Wostradowski, R. Röler, T. Fuchs, K. Nakamura, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, and F. Jelezko, "Compact integrated magnetometer based on nitrogen-vacancy centres in diamond," Diam. Relat. Mater. **93**, 59-65 (2019).

66 F. M. Stürner, A. Brenneis, T. Buck, J. Kassel, R. Röler, T. Fuchs, A. Savitsky, D. Suter, J. Grimm, S. Hengesbach, M. Förtsch, K. Nakamura, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, and F. Jelezko, "Integrated and portable magnetometer based on nitrogen-vacancy ensembles in diamond," Adv. Quantum Technol. **4**, 2000111 (2021).

67 Z. Fu, H. F. Wen, W. Hao, Y. Liu, X. Li, and Z. Li, "Portable magnetic camera using NV Centers," IEEE Trans. Instrum. Meas. **73**, 1502609 (2024).

2 고효율 광학 인터페이스 개발을 통한 고성능 스핀 점결합 양자 센서 기술 동향



문중성 한국전자통신연구원, 양자기술연구본부, 양자센서연구실, 연구
E-mail: jongsung_moon@etri.re.kr
ETRI 양자기술연구본부, 양자센서연구실, 연구원 (2024.07~)
UNIST 박사 후 연구원 (2024.03~2024.06)
UNIST 물리학과 석·박사 통합과정 (2018.03~2024.02)
UNIST 물리학과 학사과정 (2014.03~2018.02)

김제형 울산과학기술원 (UNIST), 부교수
E-mail: kimjehyung@unist.ac.kr
UNIST 물리학과 조/부교수 (2017.08~현재)
콜로라도 대학 JILA 객원 연구원 (2023.08~2024.07)
메릴랜드 대학 박사 후 연구원 (2014.09~2017.08)
KAIST 물리학과 박사 졸업 (2008.02~2014.02)

I. 서론

양자 센싱이란 양자역학의 원리에 기반한 센싱 기술로서 양자 에너지 상태, 양자 결맞음, 양자 중첩 및 양자 얽힘과 같은 양자역학적 특성을 활용하여 자기장, 온도, 압력, 중력, 위상 등의 물리적 특성을 감지하고, 나아가 기존 고전 센서의 한계를 넘어 측정 감도, 분해능, 정밀도 등의 양자 이득을 구현하는 기술을 말한다^[1]. 이러한 양자 센싱을 구현하는 플랫폼으로는 원자 기반 양자 센싱^[2], 간섭계를 통한 양자 광학계 구축^[3], 고체 내 스핀^[4]이나 초전도체^[5]를 활용한 고체 기반 양자 시스템 등 다양한 방식이 존재한다. 각각의 양자 시스템은 제각각의 특징과 강점을 가지고 있으며, 본 글에서는 고체 기반 양자 시스템을 활용하여 양자 센싱을 구현하는 기술에 관련된 내용을 알아보려 한다. 특히 고체 기반 시스템은 확장 가능성이 뛰어나고, 현존하는 광학소자 및 전자소자와의 호환성 또한 탁월하기 때문에 안정적인 구동 및 소형 소자화 용이성이라는 장점을 가진다. 다양한 고체 시스템 중에서도 최근에는 고체 내 스핀 점결합이 주목받고 있는데, 이는 상온과 같은 일반적인 환경에서도 활용이 가능하며^[6-8], 기존의 광학·전자 소자 플랫폼과의 집적이 용이해^[9,10] 실용적인 양자 센서의 등장을 가능케 하였기 때문이다.

고체 내 점결합이란 화학적 결합을 이루고 있는 고체 구조 내에서 특정 위치의 원자가 빠지거나 다른 원자로 대체되는 경우에 생기는 구조적 결함을 뜻하는데[그림 1 (a)], 이 때 고체 시스템의 넓은 밴드갭 사이에 점결합에 의한 특정 에너지 상태가 생긴다. 이를 잘 활용하면 원자물리에서의 복잡한 단일 원자 포획 시스템 없이도 단일 양자구조에 접근이 가능하고, 이러한 광학 전이로부터 단일 광자 광원을 얻을 수 있다^[11,12]. 나아가 이렇게 생성된 점결합 에너지 상태 중 일부는 에너지 상태 내에 존재하는 전자나 핵의 스핀에 따라 밝기와 같은 광학적 특성이 달라지기 때문에, 이 점결합의 스핀 상태를 광학적으로 제어 및 판독이 가능한 스핀 큐비트로서 활용할 수 있다[그림 1 (b)]^[8,13]. 이와 같이 고체 내 점결합이 갖는 스핀에 따른 미세 에너지 구조를 잘 활용하면 자기장, 온도, 응력, 압력 등의 외부 물리적 환경에 따라 변하는 스핀 에너지 레벨을 손쉽게 광학적으로 측정할 수 있고, 이를 이용하여 광신호 기반 양자

스핀 센서 기술 구현이 가능하다[그림 1 (c)]^[14,15]. 이를 스핀 점결함이라고 부른다. 또 점결함의 에너지 천이가 가시광 영역에 있을 때, 점결함의 흡수 및 발광 파장에 따라 고체 결정의 색이 결정되기도 해서 색 중심(color center)이라고 부르기도 한다. 대표적인 사례로서 다이아몬드 NV (질소 공공) 점결함^[16], 탄화규소 내 점결함^[8,17], 질화붕소 내 붕소 점결함^[18,19] 등 다양한 wide-bandgap 소재에서의 스핀 점결함이 연구되고 있으며, 실험실 단계에서 광학 테이블 위 레이저 공초점 현미경을 활용하여 점결함의 특성 분석/제어/측정 등의 다양한 양자 센싱 기초 연구 수행부터 나노 소재 측정^[20], 바이오^[21], 방위^[22,23] 및 제조산업^[24] 등 다양한 응용 분야에서 활용 가능한 실용적인 양자 센서의 구현까지가 연구의 목표이다.

실용 양자 센서의 핵심 요소는 높은 센싱 민감도와 관측 대상에 적합한 활용성(공간 분해능, 측정 시간, 측정 대상과의 거리, 안정성, 사이즈 등)이다. 하지만 굴절률이 높은 고체 매질 내에 위치한 스핀 점결함은 전반사 효과로 인해 양자 센싱 민감도의 중요한 변수인 밝기가 제한된다. 또한 일반적인 공초점 현미경계(confocal microscopy)나 대면적 형광 이미징(widefield fluorescence imaging)과 같은 광학 이미징 방식은 회절 한계와 같은 공간 분해능의 제약이 있으므로 크기 100 nm 이하의 세포나 바이러스 이미징^[25] 등 회절 한계 이하의 공간 분해능이 필요한 센싱 기술에 적용하기 힘들다. 이에 더해 소형 시료를 분석하기 위한 현미경 기반의 센싱 기술은 관측 가능 대상이 크게 제약되어 있다는 어려움도 존재한다. 그러므로 기존의 광학 기기 분야에서 보다 높은 분

해능과 센싱 감도를 가진 고성능 양자 센서 기술 개발과 함께 관찰 가능 대상의 범주를 넓히기 위해서는 보다 효율적인 광학 인터페이스 및 탐침 형태의 집적 소자화 기술을 개발하여야 한다.

이 소개글에서는 고성능 스핀 점결함 양자 센서 소자를 위한 고효율 광학 인터페이스 개발부터, 이를 활용한 양자 센서 소자의 구현에 관한 연구 및 기술 동향에 대해 소개하려고 한다. 나아가 기제작된 스핀 점결함 기반 양자 센서 소자가 현재 다양한 산업분야에서 실제로 어떻게 활용되고 있는지 다뤄보도록 한다.

II. 스핀 점결함 특성화 용 고효율 광학 인터페이스 개발

스핀 점결함 기반의 양자 센싱의 보편적인 방법은 스핀 점결함 양자상태의 초기화(initialization), 조작(manipulation) 및 판독(readout) 과정을 광학적인 방식으로 구현하는 것으로서 이러한 과정을 광학 검출 자기 공명(optically detected magnetic resonance, ODMR) 분광법이라고 한다^[19,26]. 따라서 스핀 결함을 다루기 위해서는 효율적인 광학 특성화 시스템을 구축하는 것이 매우 중요하다. 그러나 일반적으로 양자 센싱에 사용되는 광학 시스템인 주사형 공초점 현미경(confocal scanning microscopy) [그림 1 (b)]은 공간

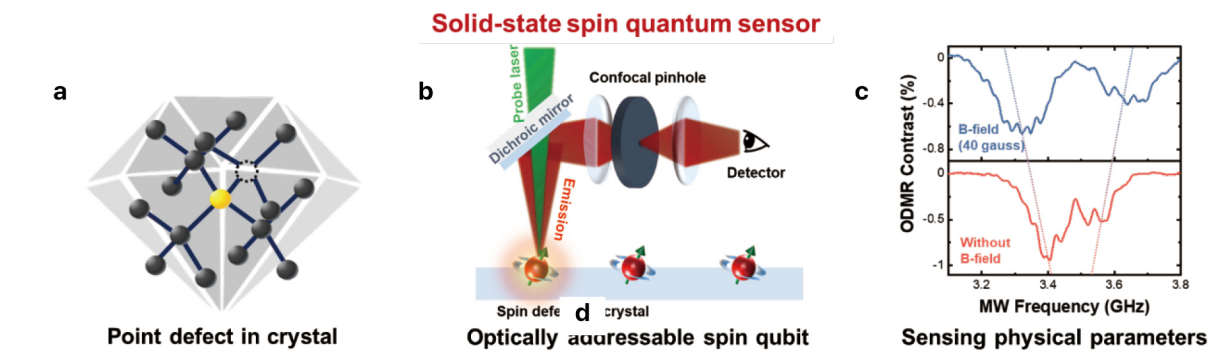
해상도와 광학 판독 감도 측면에서 성능이 제한된다. 이때 공간 해상도의 이미징 성능은 주로 광학 시스템의 회절 한계에 의해 제한되고($d\lambda/2NA$), 양자 센싱의 감도는 ODMR 스펙트럼(선폭 및 대비)과 스핀 점결함의 밝기에 크게 영향을 받는다. 스펙트럼의 선폭은 스핀 결함 자체의 특성에 의해 결정되고, 밝기는 양자 효율, 빛 추출률 및 광자 수집 효율의 곱에 의해 정해지는데, 고체 물질의 높은 굴절률에 의한 전반사는 이러한 스핀 점결함의 광학적 밝기를 약화시킨다. 따라서 양자 센싱 능력을 향상시키기 위해서는 이러한 고체 소재에서 기인하는 광학 인터페이스의 효율 저하를 극복할 연구 전략이 필요하다.

본 글에서는 스핀 점결함의 광학적 특성을 개선하기 위해 다음과 같이 여러 가지 연구 전략을 소개하고자 한다. 연구 전략의 그 첫번째는 소재 자체적인 밝기 향상을 위한 나노 구조 제작 방법이고, 두번째로는 기존 소재에 마이크로/나노 광학 렌즈 등의 광학구조를 결합하는 접근 방식, 마지막으로 빛-물질 상호작용을 제어하는 공진기 구조 결합 방법이 있다.

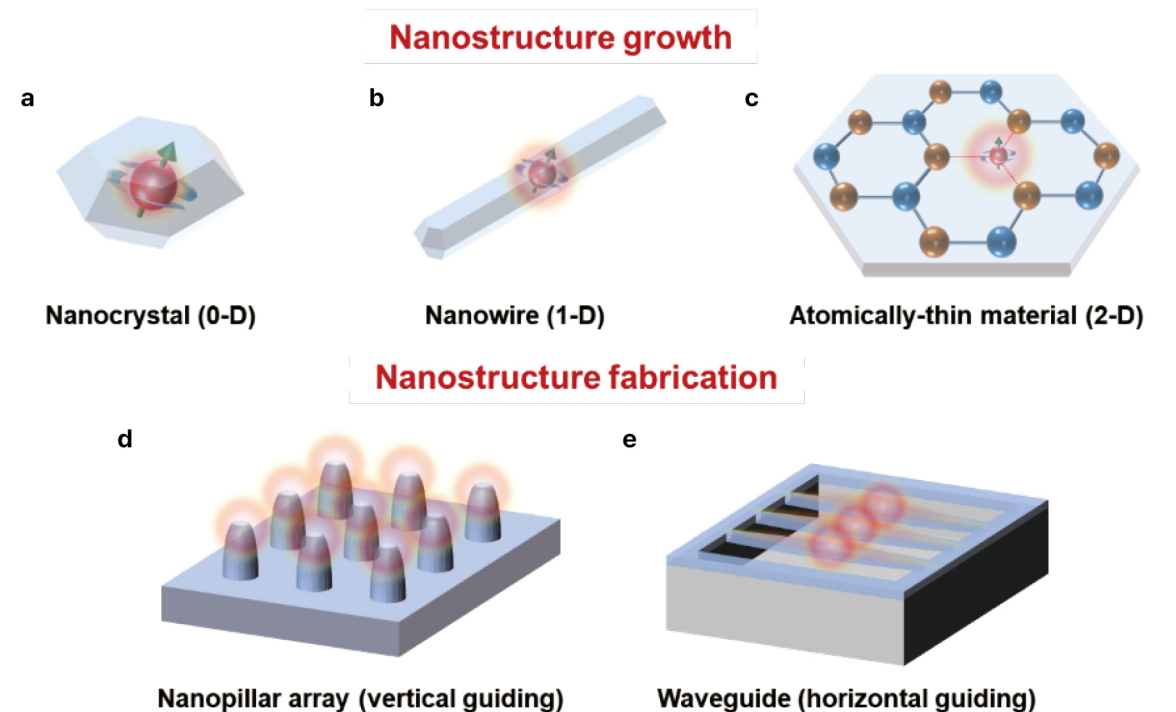
이러한 광학 인터페이스 개선과 빛과 물질 간 상호작용을 제어하는 연구는 활용 목적에 맞게 효율적인 스핀 점결함 특성화를 가능케 함으로써 나노 단위 양자 센싱을 위한 스캐닝 프로브, 광범위 양자 이미징, 그리고 광섬유 통합 양자 센싱 프로브 등을 가능케 하여 양자 센싱의 효율, 성능의 개선과 함께 적용 범위를 넓혀가고 있다.

2.1. 저차원 나노구조 기반 점결함 소재 성장 및 공정

높은 굴절률의 고체 환경에 의한 낮은 광 추출 효율과 같은 문제점을 극복하는 방법은 이미 다양하게 연구되었는데, 나노 구조체를 성장시키거나 나노 공정을 통해 나노 크리스탈, 나노 막대, 나노 박막과 같은 저차원 나노 구조를 제작하는 것이 그 대표적인 방법이다. 수 나노미터부터 수백 나노미터 크기의 저차원 나노 구조체는 고체 구조의 큰 문제점인 높은 굴절률에 의한 전반사 효과를 효과적으로 줄임으로써 스핀 점결함의 광학적 밝기를 크게 증진시킬 수 있으며^[m], 이러한 나노 단위의 극미세 광학구조는 광 집적 회로나 광섬유와



↑ [그림 1] 고체 스핀 점결함 기반 양자 센서. (a) 고체 내 점결함의 원자 구조에 대한 모식도, (b) 스핀 점결함의 특성화용 광학 시스템 예시(공초점 현미경계). (c) 스핀 점결함을 통해 물리적 환경을 관측한 예시. 양자 센서로서 활용된 질화붕소 내 붕소 점결함의 외부 자기장 감지 결과, 40 가우스의 자기장 하에서 Zeeman 효과가 일어난 것을 광학 검출 자기 공명 분광법을 통해 계측함



↑ [그림 2] 나노 구조 성장 및 공정을 이용한 효율적인 나노 광학 소자 개발 모식도. (a) 영차원(0-D) 나노크리스탈, (b) 일차원(1-D) 나노 와이어, (c) 이차원(2-D) 원자층 물질, (d) 나노 필라 배열, (e) 마이크로 광 도파로

같은 상용 광학 플랫폼과의 호환성이 높다는 장점이 있다^[27,28]. 그 대표적인 예시로 100 nm 이하 크기의 나노 크리스탈 구조를 이용하는 방법을 들 수 있으며^[6], 나아가 일차원 구조체를 가지는 나노 튜브^[29], 나노 와이어^[30], 혹은 육방정계 질화붕소와 같은 이차원 원자층 물질^[18,19]을 활용하는 방법도 있다. 이러한 저차원 나노 구조는 성장 단계에서 생성할 수도 있고, 다이아몬드나 탄화규소와 같은 벌크 매질을 패터닝, 식각과 같은 나노 공정을 통해 효율적인 광학 구조체를 제작하는 방법을 채택할 수도 있다. 후자의 예시로 나노 기둥^[31,32]이나 광도파로^[33] 구조를 제작하는 방법이 있다. 이렇게 제작된 광학 구조체는 전반사 효과를 억제하여 밝기를 크게 증진시킬 뿐만 아니라, 점결합의 광 방출 방향과 패턴을 효율적으로 제어함으로써 대물렌즈에서 광포집 효율을 크게 확대하고, 집적 광 채널(광도파로, 광섬유)을 사용하여 광신호를 전달함으로써 양자 센싱의 활용성을 크게 향상시킬 수 있다.

2.2. 마이크로 광학 렌즈 결합

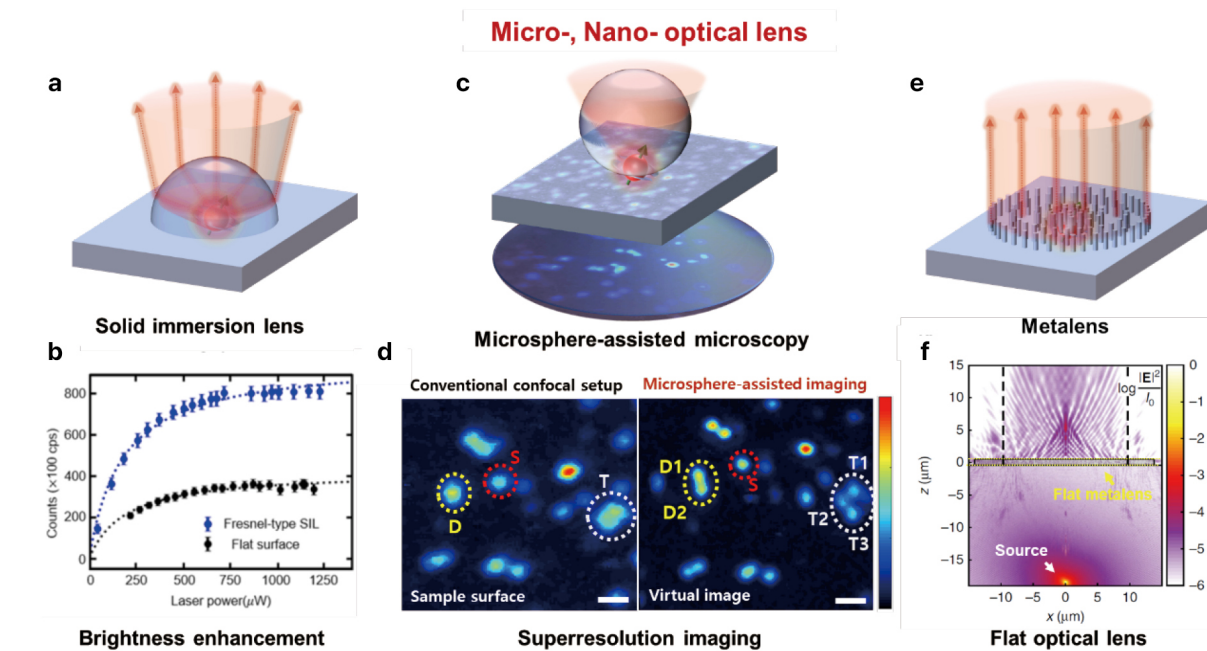
앞서 설명한 나노 구조 성장 및 제작 방식은 점결합의 광 추출 효율을 효율적으로 증진시키는 데에는 유리하지만 나노 구조 형성에 의해 외부(표면)의 영향이 커지며 스핀의 결맞음 시간이 짧아지거나 점결합 방출이 깜빡거리는(blinking) 현상 등이 일어나며, 이로 인해 센싱의 감도가 오히려 악화되는 경우도 발생한다^[34, 35]. 그러므로 점결합 밝기를 증진시키면서도 저차원 나노 구조에서의 악영향을 피하기 위한 방법의 일환으로 다양한 렌즈 구조를 도입하려는 연구가 많이 시도되었다. 렌즈 구조 도입법은 단순 밝기 증진뿐만 아니라 이미징 확대를 통한 분해능 향상 효과가 있어 점 결합 기반 스핀 이미징 기술 개발 시 이점이 있다. 또한 렌즈와 같은 광학 도구를 이용하여 광 포집을 하는 방법과 동일하여 매우 직관적이며, 다이아몬드와 같은 점결합을 내포한 고체 물질에 마이크로 공정을 가하여 고체 침지 렌즈(solid immersion lens)를 제작하거나^[36,37], 미소 구체(microsphere)를 점결합 위에 위치시켜 점결합을 이미징하는 방식으로도 구현할 수

있다^[38,39]. 특히 미소 광학 렌즈는 고체 환경 표면의 광학 인터페이스를 조율하여 원거리장의 전파 각도를 좁히고, 더욱 높은 개구수(numerical aperture, NA)를 제공하기 때문에 광 추출 및 광 포집 효율이 비약적으로 상승한다. 일례로 고체 침지 렌즈를 사용하여 다이아몬드 내 단일 NV 색 중심에서 밝기가 10배 이상 증진된 사례가 보고된 바 있다^[37]. 게다가 개선된 광학 인터페이스는 점결합 이미징 시 밝기뿐만 아니라 공간 분해능까지 증진시킬 수 있으며, 미소 구체를 응용하여 기존의 공초점 현미경계의 회절 한계보다 가까이 위치한 두 단일 점결합에 대한 개별적인 스핀 동작을 성공한 사례도 있다^[38]. 이러한 초분해능 영역에서의 양자 구조 제어와 측정능 양자 센싱의 분해능 향상과 함께 다양한 양자 다체 시스템에서의 상호작용 연구에도 큰 도움을 준다^[40]. 최근에는 구형의 미소 광학렌즈와 함께 메타 광학 분야와 결합하여 메타 렌즈의 설계 및 점결합 이미징 적용 연구도 활발하게 진행되고 있는데, 메타 렌즈는 거의 1에 가까운 개구수를 제공할 뿐만 아니라^[41] 박막 형태로 가공이 가능하다는 점에서 양자 센서의 감도 증가와 더불어 광 집적 회로, 광섬유 등 널리 사용되는 광학 플랫폼에서 스핀 점결합을 효율적으로 집적하는

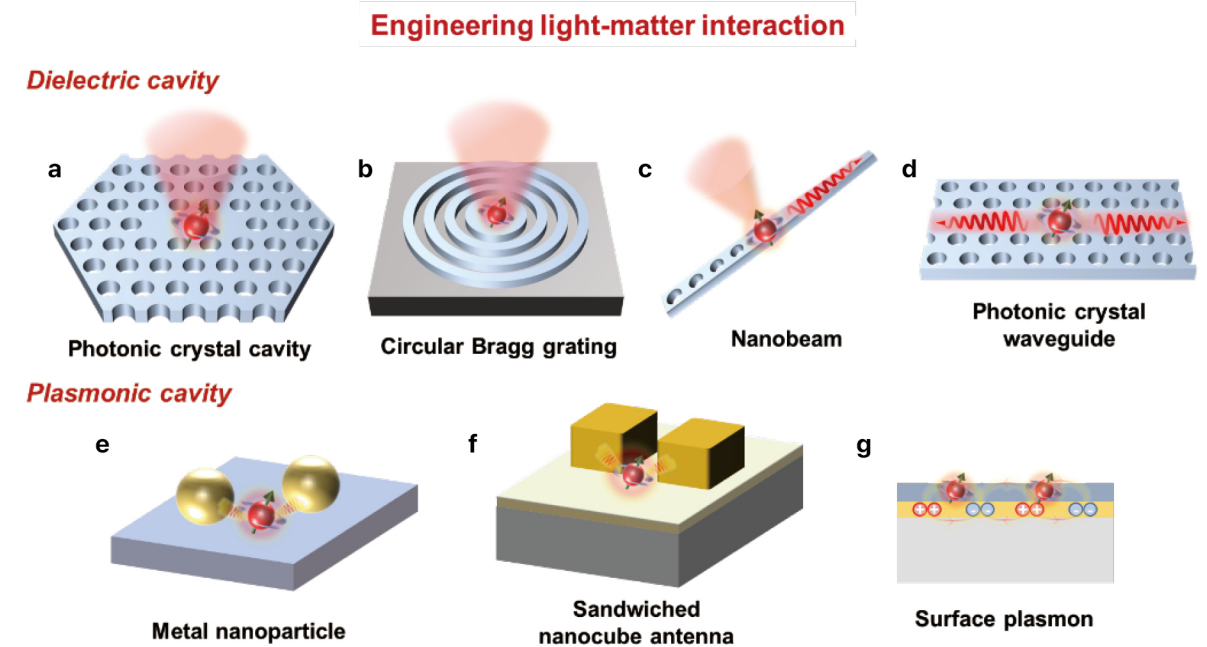
것이 가능하다는 장점을 가지고 있다^[42,43].

2.3. 공진기 구조를 활용한 빛-물질 상호작용 제어

나노 구조, 마이크로 렌즈와 같은 고효율 광학 인터페이스의 활용은 광 추출 및 광 포집 효과를 높여 밝기를 증진시켜 양자센서의 성능을 크게 향상시킬 수 있으나, 밝기 향상을 넘어 특정 파장에서의 선택적 광 방출 증진, 재결합 속도 향상, 광 방출 패턴의 재설계 등 적용 대상 맞춤형 활용성 증대를 위해서는 보다 능동적인 특성 제어 기술이 필요하다. 광 공진기 등을 활용하면 스핀 점결합 양자구조에서의 빛-물질 상호작용 제어가 가능한데, 최근 원하는 파장에 맞춰 설계된 광 공진기 구조 결합을 통해 특정 광학 공진 주파수에서 점결합의 자발 방출 속도(양자 효율)를 상승시키고^[45], 공진기의 구조에 따라 원거리장 방출 각도 및 방향을 조절하는 등^[46] 다양한 광학적 특성 제어를 성공적으로 구현하는 데에 성공하였으며, 이는 단순히 빛의 추출률 및 포집률을 증가시키는 것을 넘어 점결합의 스펙트럼, 밝기, 광 방출 패턴 등 광학적 특성 자체를 개선하는 데에 사용되고 있다.



↑ [그림 3] 마이크로, 나노 스케일 광학 렌즈를 통한 효율적인 스핀 점결합 이미징 기술 개발에 관한 모식도 및 개선점. (a) 고체 침지 렌즈와 (b) 이를 통한 점결합 밝기의 증진 효과. Reproduced with permission from S. Park *et al.* Opt. Express 2023; 31: 20586-20594. Copyright © 2023, Optica Publishing Group^[44]. (c) 미소구체 보조 현미경 이미징 기술을 이용한 (d) 초해상도 점결합 이미징 결과. 왼쪽의 일반적인 공초점 현미경계에서 하나의 점결합으로 보이는 두 점결합 D 및 세 점결합 T를 미소구체 하에서 각각 D1-2 및 T1-3으로 이미징 성공. 하단의 흰색 스케일 바: 500 nm. Reproduced from J. S. Moon *et al.* ACS Photonics 2021; 8: 2642-2649. Copyright © 2021, American Chemical Society^[38]. (f) 메타렌즈에 관한 모식도 및 (f) 평면 렌즈로서의 구조적인 특징과 원거리장의 효과에 관한 시뮬레이션 결과. Reproduced from T.-Y. Huang *et al.* Nat. Commun. 2019; 10: 2392. Copyright © 2019, T.-Y. Huang *et al.*^[42]



↑ [그림 4] 빛-물질 상호작용 제어를 위한 다양한 광학 공진기 제작 모식도. 유전체 공진기 기반 나노광학 소자의 제작: (a) 광 결정, (b) 원형 브래그 격자, (c) 나노빔, (d) 광 도파로. 플라즈모닉 공진기 소자의 제작: (e) 금속 나노입자, (f) 금속 박막-나노큐브 계면, (g) 표면 플라즈몬을 이용한 공진기 구조의 구현 모식도

광 공진기 구현에는 다양한 접근 방식이 존재하는데, 크게 매질 자체에 유전체 나노 광학 공진기를 제작하는 방식과 금속 매질을 활용한 플라즈모닉 공진기 제작 방식으로 나눌 수 있다. 그 중 유전체 공진기의 하위 범주로서 수직 광학 방출 모드의 향상을 위한 광 결정 공진기^[47,48]와 원형 브래그 격자^[46,49], Fabry-Perot 마이크로필라 공진기^[50] 등과 함께 소자 내에서의 빛의 가로 방향 전파를 고려한 도파로^[51,52], tapered 나노빔^[53] 등 다양한 광학 공진기 구조에 대한 연구가 진행되었다. 그 중 특히 빛-물질 간의 상호작용을 크게 제어하는 것이 가능한 좁은 선포의 공진 주파수를 가진 공진기에서 스핀 점결합의 광 방출의 분산을 크게 줄이는 것이 가능하며, 광 집적 회로나 광섬유와 결합 시 큰 이득을 얻을 수 있을 것이라 기대된다^[30,47]. 그 외의 또 다른 공진기로는 금이나 은과 같은 금속 나노입자^[54,55], 나노구조를 통한 플라즈모닉 공진기^[56-58]를 활용하는 방법 등이 있다. 플라즈모닉 안테나 현상은 공진 주파수가 넓기 때문에 광 주파수가 랜덤하게 분포하는 스핀 점결합에 활용하여도 쉽게 광 특성을 증진시킬 수 있으며, 부피가 극히 작은 공진기 모드를 가지고 있기 때문에 양자 센서로 활용할 시 밝기 증진으로 인한 양자 센싱 감도 및 공간 분해능 향상이 가능하다^[56,59].

III. 개선된 광학 인터페이스를 통한 고성능 집적 양자 센서 소자 개발

고효율 광학 인터페이스는 스핀 점결합과 통용되는 양자 센서 플랫폼을 효과적으로 연결하기 위해 개발되고 있으며, 현재까지 개발된 스핀 점결합을 활용한 실용 양자 센서 플랫폼으로는 주사 탐침형 양자 센서, 대면적 광역 양자 현미경, 광섬유 결합형 양자 센서 등이 있다. 실용 양자 센서 플랫폼과 스핀 점결합 결합을 결합 시 양자 센싱에서 어떤 종류의 플랫폼과 소재를 결합하였는지에 따라 각각 특징 및 강점을 가지게 되는데, 예를 들어 탐침에 부착된 나노 구조 내 단일 스핀 점결합의 경우 나노 단위의 해상도를 가지고 있으며, 대면적 광량 이미징 기술을 벌크 소재 내 위치한 점결합에 적용

하면 큰 면적을 실시간으로 초고속 이미징하는 양자 현미경 기술 구현이 가능하고, 광섬유와 결합한 양자 센서 소자는 소형화를 통한 휴대성 및 광섬유 채널을 이용한 양자 센싱 정보의 분산 처리 등의 강점을 가지고 있다(그림 5). 최신 연구 동향은 이러한 다양한 조합마다의 강점을 극대화시키는 전략으로 실험실 수준을 넘어 상업적, 산업적 활용을 위해 전 시스템을 패키징화하고 소형화 양자 센서 시스템을 만드는 방향으로 흐르고 있으며, 나아가 이를 실사용하는 방안을 모색하는 단계에 이르렀다.

3.1. 주사 탐침형 양자 센서

스핀 점결합이 쉽게 다른 플랫폼과 집적화가 가능하다는 장점은 공초점 현미경계와 같은 광학 시스템에서의 스핀 점결합 특성화 가능성에 힘입어 원자힘현미경(atomic force microscopy) 캔틸레버와 같은 탐침에 부착해 양자 센싱 타겟을 스캐닝하는 주사 탐침형 양자 센서의 개발을 가능하게 하였다^[16]. 나노 결정 내 존재하는 단일 NV 색중심을 탐침에 집적시킨 뒤 나노미터 수준의 정밀 스테이지에 부착한 시료의 자기장, 온도 등을 탐지하는 방식을 사용하는 양자 센서는 수 나노미터에서 수십 나노미터 정도의 매우 뛰어난 공간 분해능을 가지고 있어 바이오 이미징^[21], 신소재 및 신소자의 물리적 특성 분석^[20] 등 다양한 범위에서 활용되고 있다. 이러한 접근 방식은 현재에도 계속해서 개선되고 있는데, 나노결정 대신 나노필라^[31], 쌍곡선 나노필라^[60] 등의 형태로 가공하여 더욱 광 포집 효과를 높임으로써 양자 센싱 감도를 증진한 것이 그 사례이며 최근에는 다양한 스타트업 기업에서 다이아몬드 NV 색중심이 부착된 탐침형 양자 센서를 상업적으로 판매하는 단계까지 이르렀다^[61].

3.2. 광역 양자 현미경

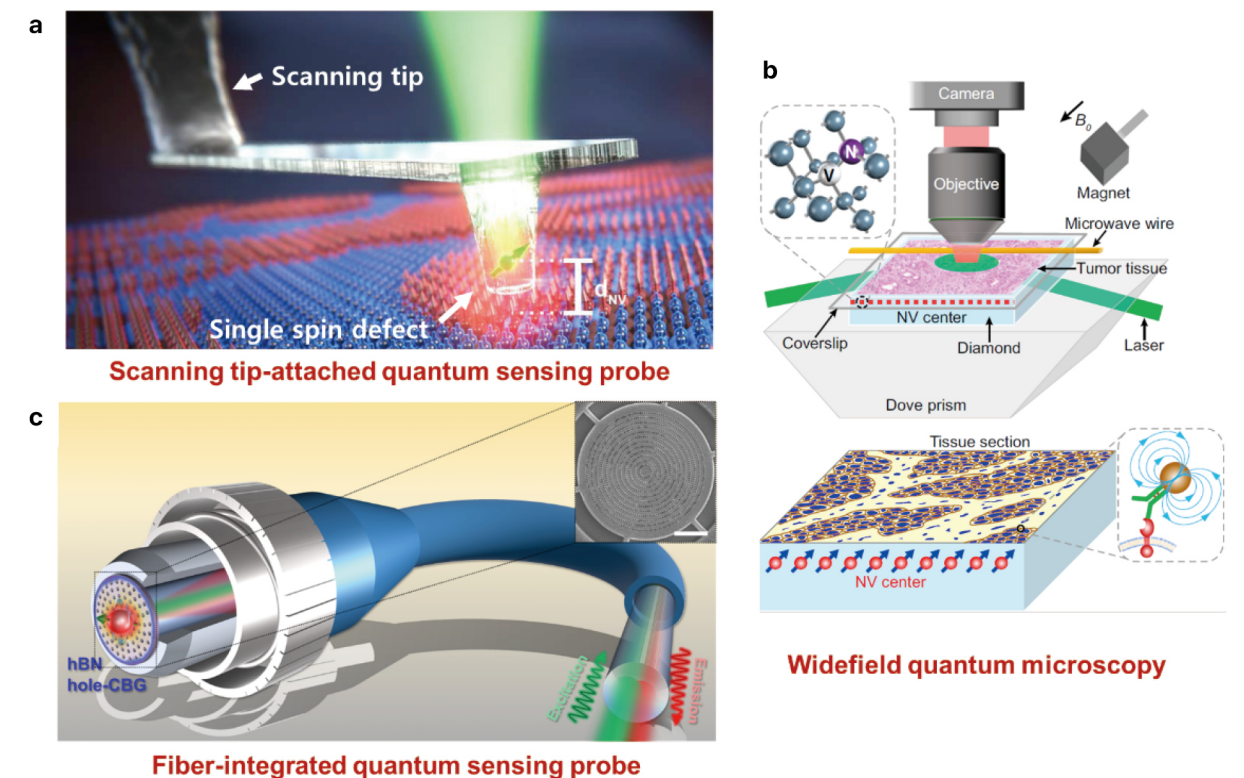
광역 양자 이미징 기술은 넓은 면적의 이차원 영역에 위치한 스핀 점결합들을 그보다 공간적으로 더 넓은 여기 레이저를 이용해 한 번의 분광 측정만으로 여러 개의 양자 센싱 결과를 얻을 수 있는 기술이다. 이러한 고속 광역 이미징 기술을 구현하기 위해서는 넓은 이차원(2D) 영역에 존재하는 스핀 점결합 광 방출의 맵핑(mapping)이 필수이며, 실험실

단계에서부터 상용 단계까지 폭넓게 통상적으로 적용할 수 있는 광역 양자 이미징 방법으로는 벌크 매질 내 스핀 점결합의 넓은 영역의 방출을 외부 대물렌즈로 포집한 후, 2D 배열로 형성된 CCD 및 CMOS 광검출기로 맵핑하는 대면적 광 현미경 분광법을 이용해 광역 양자 현미경을 구현하는 방식이 있다^[62]. 이 때 기존의 벌크 매질에서 방출되는 스핀 점결합의 광 방출의 효율을 높이기 위해서 2D-나노 필라 배열이나 나노 광학 공진기 등 나노 공정이 적용된 점결합 소자를 이용해 보다 고감도의 고속 양자 이미징 기술을 구현할 수 있다^[32,63]. 나아가 이러한 광역 양자 이미징 기술의 집적화 및 소자화를 통한 이차원 양자 이미징 카메라를 개발하기 위한 연구도 진행 중이며, 그 일환으로 CMOS 광검출기 배열을 스핀 점결합 소자에 집적시킴으로써 점결합의 광 방출을 외부에서 포집하지 않고 소자에 집적된 광전소자를 사용하여 대면적 양자 센싱 결과를 맵핑하는 양자 카메라 기술의 개발이

보고된 바 있다^[64]. 이러한 실시간, 초고속, 광역 양자 이미징 기술의 구현은 다양한 산업 분야에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

3.3. 광섬유 결합형 양자 센서

양자 센싱 정보를 광학적으로 판독할 수 있다는 것은 소형화, 연결성, 유연한 광경로 등 광섬유의 다양한 응용 가능성을 접목할 수 있다는 의미이기도 하다. 이러한 광섬유의 특징을 살리면 휴대 가능한 소형 원격 양자 센서 탐지기^[65, 66]부터 원거리 양자 센싱 플랫폼까지 구현할 수 있으며^[67], 이를 위해서는 광섬유에 스핀 점결합을 집적시키는 기술을 개발할 필요가 있다. 따라서 기존의 고밀도의 점결합을 가진 벌크 물질을 광섬유 끝에 부착하는 방식^[68]에서 한걸음 더 나아가 tapered 나노빔 구조를 다이아몬드 등 호스트 물질에 직접 제작하는 것을 통해 접착된 광섬유에 보다 효율적으로 광



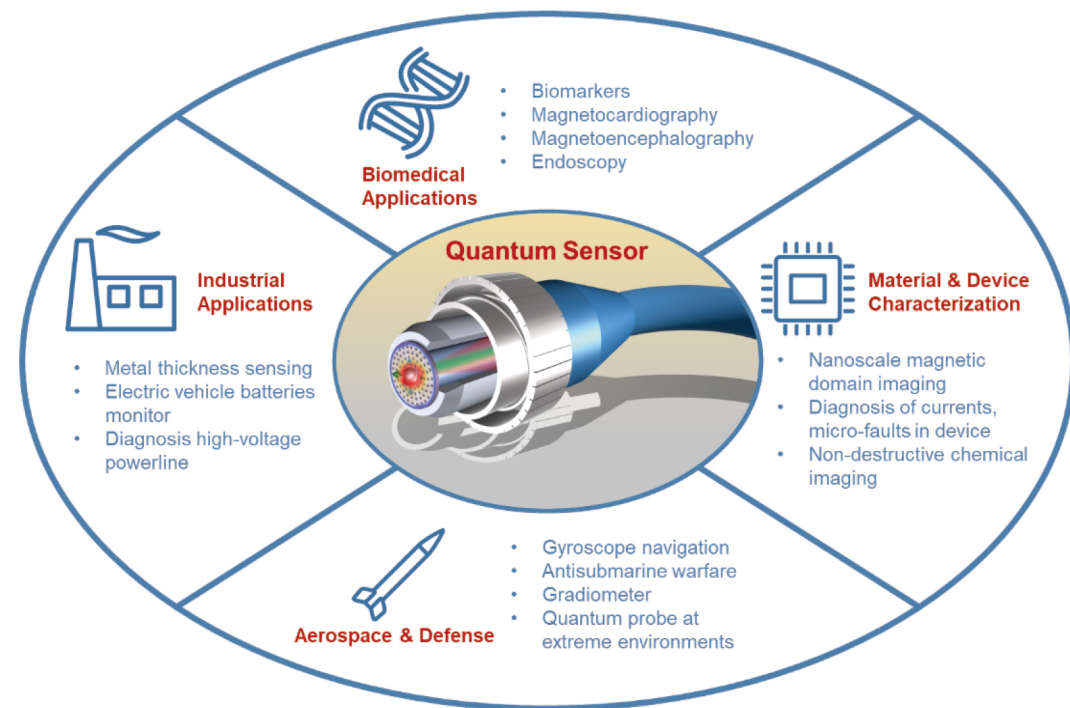
↑ [그림 5] 스핀 점결합을 활용한 실용적 양자 센서의 구현. (a) 원자힘현미경 탐침에 부착된 나노필라 구조의 단일 스핀 점결합 양자 센서에 관한 모식도. Reproduced from N. Waasem *et al.* Photonics Views 2021; 18; 36-39. Copyright © 2021, Wiley-VCH GmbH^[61]. (b) 광역 점결합 이미징을 통한 대면적 양자 현미경 기술의 구현. Reprinted from S. Chen *et al.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2022; 119; e2118876119. Copyright © 2022, S. Chen *et al.* ^[62]. (c) 광섬유 코어에 결합된 질화붕소 광학 공진기 양자 센서 프로브. 삽입된 이미지는 hBN 광학 공진기의 주사전자현미경 이미지를 나타냄. 스케일 바: 5 μm . Reproduced with permission from J. S. Moon *et al.* Adv. Opt. Mater. 2024; 12; 2401987. Copyright © 2024, J. S. Moon *et al.* Advanced Optical Materials published by Wiley-VCH GmbH^[70].

방출을 결합시키거나^[53,69], 원형 브래그 격자 광학 공진기를 제작한 후 이를 광섬유의 끝에 집적화하는 등 효율적인 광섬유 결합형 양자 센서 제작을 위한 다양한 연구가 진행되었다^[70]. 나아가 광섬유를 통한 원격 탐지의 가능성을 확인한 뒤 다양한 환경에서의 자력계, 온도계로의 활용 가능성^[68,71] 및 비접촉, 비파괴적 철강 두께 측정 가능성^[70], 전기차 배터리 충전량 계측 등의 산업적 활용 가능성^[72]까지 모색되었다. 이러한 연구 결과는 휴대용 원격 탐지 양자 센서의 구현 가능성을 시사하며, 나아가 광섬유 네트워크를 통한 분산 양자 센싱 구현을 전망하는 기반이 되었다^[67].

IV. 스핀 점결함 양자 센서의 응용 - 연구실에서 산업으로

스핀 점결함 양자 센서 기술의 발전은 현재 실험실을 넘어 다양한 산업에서의 활용을 모색하는 단계에 이르렀으며,

대표 사례로 바이오, 소재 및 소자 진단, 제조업 및 항공우주 산업에서의 활용을 들 수 있다(그림 6). 다이아몬드와 같이 독성이 낮은 물질은 스핀 점결함을 통해 바이오 마커, 바이오 라벨로 활용되며^[73], 또한 뇌자도^[74] 및 심자도^[75] 측정 프로브나 광섬유 결합형 양자 센서 프로브를 사용한 양자 내시경^[76] 등 다양한 활용 가능성을 가지고 있다. 한편 탐침형 양자 센서 프로브는 나노미터 수준의 분해능을 이용하여 신소재의 자성을 측정하거나^[77], 새로 설계한 소자의 전류 흐름을 계측하는 등^[78] 소재 및 소자 특성화에서도 우수한 성능을 보여주는 것으로 확인되었다. 나아가 양자 센서 프로브의 비접촉, 비파괴적인 센싱 능력은 기존의 철강 두께 측정 방식을 대체하거나^[70], 고압 송전선의 전류 계측^[79], 그리고 전기차 배터리의 충전량을 진단하는 등 각종 분야에서 실험을 이미 마쳤기에^[72] 철강, 전력 및 제조 산업에서도 활약할 수 있을 것이라 기대된다. 또한 고체 시스템의 구조적 안정성은 매질이 바뀔 경우 또는 항공 및 우주와 같은 극한 환경에서도 작동할 수 있는 양자 센서의 구현 가능성을 의미하며, 이를 고려하면 심해 잠수함 탐지와 같은 방위 산업^[23], 우주 환경에서의



↑ [그림 6] 실제 산업에서의 양자 센서 활용

자기장의 벡터 및 구배 측정(gradiometer) 양자 센서로서의 활용 가능성 또한 열려있다고 볼 수 있다^[22,80].

이렇듯 스핀 점결함 기반 양자 센서 기술은 일반적인 환경(상온, 상압 등)에서부터 극한 환경에서까지 다양한 무대에서 활약할 수 있을 뿐만 아니라, 고체 시스템의 특성을 통한 확장 가능성, 소자화 구현 및 실용성 등 압도적으로 우수한 강점을 가지고 있기 때문에 앞서 언급한 분야 이외의 다양한 산업 분야에서도 응용될 여지가 남아있다. 따라서 응용분야의 확장을 위해 지속적인 연구로 광학 신호 전달의 효율을 더욱 높이거나 공간 분해능 및 센싱 감도와 같은 센서로서의 성능을 높일 필요가 있다.

V. 결론

본 글에서는 고성능 스핀 점결함 기반 양자 센서 개발을 위한 보다 효율적인 광학 인터페이스 개발을 위한 연구부터 고성능 양자 광학 센서 소자의 개발 및 산업 분야에서의 양자 센서의 응용까지를 간략하게 소개하였다. 앞으로 다양한 분야에서 양자 센서의 역할이 중요시되는만큼 본 기술에 대한 지속적인 관심이 필요할 것이다. 몇몇 스핀 점결함의 경우에는 여전히 그 전자구조가 모호한 측면이 있는 만큼 이론적 배경이 되는 제1원리 연구가 병행되어야 하고, 고전 센싱의 한계를 넘어 양자 센싱으로서의 양자 이득을 구현하기 위해서는 양자 센싱 프로토콜의 최적화나 스핀 점결함들의 양자 얽힘, 양자 중첩 현상을 이용하는 등 새로운 물리적 토대를 구축하고 이를 구현하기 위한 양자 광학 셋업에 관한 연구가 필요하다. 상기한 물리적 이론 구축, 소자 플랫폼 개발, 센싱 프로토콜 개발 등의 연구가 맞물렸을 때 양자 센싱은 성능적으로 보다 우수하고 실용성이 뛰어난 플랫폼으로 발전할 수 있을 것이며, 직면한 여러 과제를 병렬적으로, 혹은 서로 협력하여 해결해 나감으로써 이를 실현할 수 있을 것이라 기대한다.

REFERENCES

- C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, "Quantum sensing," *Rev. Mod. Phys.* **89**, 035002 (2017).
- H. Fan, S. Kumar, J. Sedlacek, H. Kübler, S. Karimkashi, and J. P. Shaffer, "Atom based RF electric field sensing," *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48**, 202001 (2015).
- S. Pirandola, B. R. Bardhan, T. Gehring, C. Weedbrook, and S. Lloyd, "Advances in photonic quantum sensing," *Nat. Photon.* **12**, 724–733 (2018).
- J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, L. Jiang, D. Budker, P. R. Hemmer, A. Yacoby, R. Walsworth, and M. D. Lukin, "High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution," *Nat. Phys.* **4**, 810–816 (2008).
- S. P. Wolski, D. Lachance-Quirion, Y. Tabuchi, S. Kono, A. Noguchi, K. Usami, and Y. Nakamura, "Dissipation-based quantum sensing of magnons with a superconducting qubit," *Phys. Rev. Lett.* **125**, 117701 (2020).
- D. Beke, J. Valenta, G. Károlyházy, S. Lenk, Z. Czirány, B. G. Márkus, K. Kamarás, F. Simon, and A. Gali, "Room-temperature defect qubits in ultrasmall nanocrystals," *J. Phys. Chem. Lett.* **11**, 1675–1681 (2020).
- A. Gottscholl, M. Diez, V. Soltamov, C. Kasper, A. Sperlich, M. Kianinia, C. Bradac, I. Aharonovich, and V. Dyakonov, "Room temperature coherent control of spin defects in hexagonal boron nitride," *Sci. Adv.* **7**, eabf3630 (2021).
- W. F. Koehl, B. B. Buckley, F. J. Heremans, G. Calusine, and D. D. Awschalom, "Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide," *Nature* **479**, 84–87 (2011).
- S. M. Graham, A. T. M. A. Rahman, L. Munn, R. L. Patel, A. J. Newman, C. J. Stephen, G. Colston, A. Nikitin, A. M. Edmonds, D. J. Twitchen, M. L. Markham, and G. W. Morley, "Fiber-coupled diamond magnetometry with an unshielded sensitivity of 30 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$," *Phys. Rev. Appl.* **19**, 044042 (2023).
- C. Bradac, W. Gao, J. Forneris, M. E. Trusheim, and I. Aharonovich, "Quantum nanophotonics with group IV defects in diamond," *Nat. Commun.* **10**, 5625 (2019).

11

I. Aharonovich, S. Castelletto, D. A. Simpson, A. Stacey, J. McCallum, A. D. Greentree, and S. Prawer, "Two-level ultra-bright single photon emission from diamond nanocrystals," *Nano Lett.* **9**, 3191–3195 (2009).

12

N.-J. Guo, S. Li, W. Liu, Y.-Z. Yang, X.-D. Zeng, S. Yu, Y. Meng, Z.-P. Li, Z.-A. Wang, L.-K. Xie, R.-C. Ge, J.-F. Wang, Q. Li, J.-S. Xu, Y.-T. Wang, J.-S. Tang, A. Gali, C.-F. Li, and G.-C. Guo, "Coherent control of an ultrabright single spin in hexagonal boron nitride at room temperature," *Nat. Commun.* **14**, 2893 (2023).

13

L. Li, T. Schröder, E. H. Chen, M. Walsh, I. Bayn, J. Goldstein, O. Gaathon, M. E. Trusheim, M. Lu, J. Mower, M. Cotlet, M. L. Markham, D. J. Twitchen, and D. Englund, "Coherent spin control of a nanocavity-enhanced qubit in diamond," *Nat. Commun.* **6**, 6173 (2015).

14

S. Vaidya, X. Gao, S. Dikshit, I. Aharonovich, and T. Li, "Quantum sensing and imaging with spin defects in hexagonal boron nitride," *Adv. Phys.: X* **8**, 2206049 (2023).

15

A. Gottscholl, M. Diez, V. Soltamov, C. Kasper, D. Krauß, A. Sperlich, M. Kianinia, C. Bradac, I. Aharonovich, and V. Dyakonov, "Spin defects in hBN as promising temperature, pressure and magnetic field quantum sensors," *Nat. Commun.* **12**, 4480 (2021).

16

S. Hong, M. S. Grinolds, L. M. Pham, D. Le Sage, L. Luan, R. L. Walsworth, and A. Yacoby, "Nanoscale magnetometry with NV centers in diamond," *MRS Bull.* **38**, 155–161 (2013).

17

D. Simin, V. A. Soltamov, A. V. Poshakinskiy, A. N. Anisimov, R. A. Babunts, D. O. Tolmachev, E. N. Mokhov, M. Trupke, S. A. Tarasenko, A. Sperlich, P. G. Baranov, V. Dyakonov, and G. V. Astakhov, "All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide," *Phys. Rev. X* **6**, 031014 (2016).

18

A. Gottscholl, M. Kianinia, V. Soltamov, S. Orlinskii, G. Mamin, C. Bradac, C. Kasper, K. Krambrock, A. Sperlich, M. Toth, I. Aharonovich, and V. Dyakonov, "Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature," *Nat. Mater.* **19**, 540–545 (2020).

19

H. L. Stern, Q. Gu, J. Jarman, S. Eizagirre Barker, N. Mendelson, D. Chugh, S. Schott, H. H. Tan, H. Sirringhaus, I. Aharonovich, and M. Atatüre, "Room-temperature optically detected magnetic resonance of single defects in hexagonal boron nitride," *Nat. Commun.* **13**, 618 (2022).

20

S. Zhang, K. Bian, and Y. Jiang, "Perspective: Nanoscale electric sensing and imaging based on quantum sensors," *Quantum Front* **2**, 19 (2023).

21

G. Balasubramanian, A. Lazarev, S. R. Arumugam, and D. Duan, "Nitrogen-vacancy color center in diamond—emerging nanoscale applications in bioimaging and biosensing," *Curr. Opin. Chem. Biol.* **20**, 69–77 (2014).

22

J. S. Bennett, B. E. Vyhnalek, H. Greenall, E. M. Bridge, F. Gotardo, S. Forstner, G. I. Harris, F. A. Miranda, and W. P. Bowen, "Precision magnetometers for aerospace applications: A review," *Sensors* **21**, 5568 (2021).

23

B. Nathan, "Quantum sensing for anti-submarine warfare," in *Proc. 2023 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)* (Laurel, MD, USA, Mar. 11, 2023), pp. 256–258.

24

Y. Hatano, J. Tanigawa, A. Nakazono, T. Sekiguchi, S. Onoda, T. Ohshima, T. Iwasaki, and M. Hatano, "A wide dynamic range diamond quantum sensor as an electric vehicle battery monitor," *Phil. Trans. R. Soc. A.* **382**, 20220312 (2024).

25

L. Li, W. Guo, Y. Yan, S. Lee, and T. Wang, "Label-free super-resolution imaging of adenoviruses by submerged microsphere optical nanoscopy," *Light Sci. Appl.* **2**, e104 (2013).

26

J. Luo, Y. Geng, F. Rana, and G. D. Fuchs, "Room temperature optically detected magnetic resonance of single spins in GaN," *Nat. Mater.* **23**, 512–518 (2024).

27

M. Radulaski, J. L. Zhang, Y. Tzeng, K. G. Lagoudakis, H. Ishiwata, C. Dory, K. A. Fischer, Y. A. Kelaita, S. Sun, P. C. Maurer, K. Alassaad, G. Ferro, Z. Shen, N. A. Melosh, S. Chu, and J. Vučković, "Nanodiamond Integration with photonic devices," *Laser Photonics Rev.* **13**, 1800316 (2019).

28

Y. Chen, Q. Lin, H. Cheng, H. Huang, J. Shao, Y. Ye, G.-S. Liu, L. Chen, Y. Luo, and Z. Chen, "Nanodiamond-based optical-fiber quantum probe for magnetic field and biological sensing," *ACS Sens.* **7**, 3660–3670 (2022).

29

X. Gao, S. Vaidya, S. Dikshit, P. Ju, K. Shen, Y. Jin, S. Zhang, and T. Li, "Nanotube spin defects for omnidirectional magnetic field sensing," *Nat. Commun.* **15**, 7697 (2024).

30

J. H. Lee, W. B. Jeon, J. S. Moon, J. Lee, S.-W. Han, Z. Bodrog, A. Gali, S.-Y. Lee, and J.-H. Kim, "Strong zero-phonon transition from point defect-stacking fault complexes in silicon carbide nanowires," *Nano Lett.* **21**, 9187–9194 (2021).

31

P. Maletinsky, S. Hong, M. S. Grinolds, B. Hausmann, M. D. Lukin, R. L. Walsworth, M. Loncar, and A. Yacoby, "A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres," *Nat. Nanotech.* **7**, 320–324 (2012).

32

D. J. McCloskey, N. Dontschuk, D. A. Broadway, A. Nadarajah, A. Stacey, J.-P. Tetienne, L. C. L. Hollenberg, S. Prawer, and D. A. Simpson, "Enhanced widefield quantum sensing with nitrogen-vacancy ensembles using diamond nanopillar arrays," *ACS Appl. Mater. Interf.* **12**, 13421–13427 (2020).

33

M. Fujiwara, O. Neitzke, T. Schröder, A. W. Schell, J. Wolters, J. Zheng, S. Mouradian, M. Almoktar, S. Takeuchi, D. Englund, and O. Benson, "Fiber-coupled diamond micro-waveguides toward an efficient quantum interface for spin defect centers," *ACS Omega* **2**, 7194–7202 (2017).

34

J. Tisler, G. Balasubramanian, B. Naydenov, R. Kolesov, B. Grotz, R. Reuter, J.-P. Boudou, P. A. Curmi, M. Sennour, A. Thorel, M. Börsch, K. Aulenbacher, R. Erdmann, P. R. Hemmer, F. Jelezko, and J. Wrachtrup, "Fluorescence and spin properties of defects in single digit nanodiamonds," *ACS Nano* **3**, 1959–1965 (2009).

35

C. Bradac, T. Gaebel, N. Naidoo, M. J. Sellars, J. Twamley, L. J. Brown, A. S. Barnard, T. Plakhotnik, A. V. Zvyagin, and J. R. Rabeau, "Observation and control of blinking nitrogen-vacancy centres in discrete nanodiamonds," *Nat. Nanotech.* **5**, 345–349 (2010).

36

M. Jamali, I. Gerhardt, M. Rezai, K. Frenner, H. Fedder, and J. Wrachtrup, "Microscopic diamond solid-immersion-lenses fabricated around single defect centers by focused ion beam milling," *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 123703 (2014).

37

J. P. Hadden, J. P. Harrison, A. C. Stanley-Clarke, L. Marseglia, Y.-L. D. Ho, B. R. Patton, J. L. O'Brien, and J. G. Rarity, "Strongly enhanced photon collection from diamond defect centers under microfabricated integrated solid immersion lenses," *Appl. Phys. Lett.* **97**, 241901 (2010).

38

J. S. Moon, H. Lee, J. H. Lee, W. B. Jeon, D. Lee, J. Lee, S. Paik, S.-W. Han, R. Reuter, A. Denisenko, J. Wrachtrup, S.-Y. Lee, and J.-H. Kim, "High-resolution, high-contrast optical interface for defect qubits," *ACS Photonics* **8**, 2642–2649 (2021).

39

S.-H. Wu, I. Lekavicius, and H. Wang, "Microsphere-enhanced fluorescence collection for nitrogen vacancy centers in diamond," *Appl. Phys. Lett.* **125**, 171109 (2024).

40

M. Koppenhöfer, P. Groszkowski, H.-K. Lau, and A. A. Clerk, "Dissipative superradiant spin amplifier for enhanced quantum sensing," *PRX Quantum* **3**, 030330 (2022).

41

R. Paniagua-Domínguez, Y. F. Yu, E. Khaidarov, S. Choi, V. Leong, R. M. Bakker, X. Liang, Y. H. Fu, V. Valuckas, L. A. Krivitsky, and A. I. Kuznetsov, "A metalens with a near-unity numerical aperture," *Nano Lett.* **18**, 2124–2132 (2018).

42

T.-Y. Huang, R. R. Grote, S. A. Mann, D. A. Hopper, A. L. Exarhos, G. G. Lopez, A. R. Klein, E. C. Garnett, and L. C. Bassett, "A monolithic immersion metalens for imaging solid-state quantum emitters," *Nat. Commun.* **10**, 2392 (2019).

43

M. Kim, M. Jeon, N.-R. Park, S.-W. Jeon, D. Kang, S.-W. Han, and M.-K. Kim, "Improving photon gathering efficiency in nitrogen-vacancy centers using transferred metalenses," in *Proc. 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)* (Incheon, Korea, Aug. 4–9, 2024), pp. 1–2.

44

S. Park, Y.-S. Koh, D. D. Kang, G. Kim, K. Kim, and D. Kim, "Fresnel-type solid immersion lens for efficient light collection from quantum defects in diamond," *Opt. Express* **31**, 20586–20594 (2023).

45

E. M. Purcell, H. C. Torrey, and R. V. Pound, "Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid," *Phys. Rev.* **69**, 37–38 (1946).

46

J. E. Fröch, L. P. Spencer, M. Kianinia, D. D. Totonjian, M. Nguyen, A. Gottscholl, V. Dyakonov, M. Toth, S. Kim, and I. Aharonovich, "Coupling spin defects in hexagonal boron nitride to monolithic bullseye cavities," *Nano Lett.* **21**, 6549–6555 (2021).

47

A. Faraon, C. Santori, Z. Huang, V. M. Acosta, and R. G. Beausoleil, "Coupling of nitrogen-vacancy centers to photonic crystal cavities in monocrystalline diamond," *Phys. Rev. Lett.* **109**, 033604 (2012).

48

G. Calusine, A. Politi, and D. D. Awschalom, "Cavity-enhanced measurements of defect spins in silicon carbide," *Phys. Rev. Appl.* **6**, 014019 (2016).

49

L. Li, E. H. Chen, J. Zheng, S. L. Mouradian, F. Dolde, T. Schröder, S. Karaveli, M. L. Markham, D. J. Twitchen, and D. Englund, "Efficient photon collection from a nitrogen vacancy center in a circular bullseye grating," *Nano Lett.* **15**, 1493–1497 (2015).

50

Y. Dumeige, R. Alléaume, P. Grangier, F. Treussart, and J.-F. Roch, "Controlling the single-diamond nitrogen-vacancy color center photoluminescence spectrum with a Fabry–Perot microcavity," *New J. Phys.* **13**, 025015 (2011).

51

C. Li, J. E. Fröch, M. Nonahal, T. N. Tran, M. Toth, S. Kim, and I. Aharonovich, "Integration of hBN quantum emitters in monolithically fabricated waveguides," *ACS Photonics* **8**, 2966–2972 (2021).

52

M. Barth, N. Nüsse, B. Löchel, and O. Benson, "Controlled coupling of a single-diamond nanocrystal to a photonic crystal cavity," *Opt. Lett.* **34**, 1108–1110 (2009).

53

M. J. Burek, C. Meuwly, R. E. Evans, M. K. Bhaskar, A. Sipahigil, S. Meesala, B. Machielse, D. D. Sukachev, C. T. Nguyen, J. L. Pacheco, E. Bielejec, M. D. Lukin, and M. Lončar, "Fiber-coupled diamond quantum nanophotonic interface," *Phys. Rev. Appl.* **8**, 024026 (2017).

54

H. Hapuarachchi, F. Campaioli, and J. H. Cole, "NV-plasmonics: Modifying optical emission of an NV– center via plasmonic metal nanoparticles," *Nanophotonics* **11**, 4919–4927 (2022).

55

H. Guo, Y. Chen, D. Wu, R. Zhao, J. Tang, Z. Ma, C. Xue, W. Zhang, and J. Liu, "Plasmon-enhanced sensitivity of spin-based sensors based on a diamond ensemble of nitrogen vacancy color centers," *Opt. Lett.* **42**, 403–406 (2017).

56

N. Mendelson, R. Ritika, M. Kianinia, J. Scott, S. Kim, J. E. Fröch, C. Gazzana, M. Westerhausen, L. Xiao, S. S. Mohajerani, S. Strauf, M. Toth, I. Aharonovich, and Z. Xu, "Coupling spin defects in a layered material to nanoscale plasmonic cavities," *Adv. Mater.* **34**, 2106046 (2022).

57

X. Gao, B. Jiang, A. E. Llacsahuanga Allcca, K. Shen, M. A. Sadi, A. B. Solanki, P. Ju, Z. Xu, P. Upadhyaya, Y. P. Chen, S. A. Bhawe, and T. Li, "High-contrast plasmonic-enhanced shallow spin defects in hexagonal boron nitride for quantum sensing," *Nano Lett.* **21**, 7708–7714 (2021).

58

X. Xu, A. B. Solanki, D. Sychev, X. Gao, S. Peana, A. S. Baburin, K. Pagadala, Z. O. Martin, S. N. Chowdhury, Y. P. Chen, T. Taniguchi, K. Watanabe, I. A. Rodionov, A. V. Kildishev, T. Li, P. Upadhyaya, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, "Greatly enhanced emission from spin defects in hexagonal boron nitride enabled by a low-loss plasmonic nanocavity," *Nano Lett.* **23**, 25–33 (2023).

59

S. Kumar, S. K. H. Andersen, and S. I. Bozhevolnyi, "Extremely confined gap-plasmon waveguide modes excited by nitrogen-vacancy centers in diamonds," *ACS Photonics* **6**, 23–29 (2019).

60

N. Hedrich, D. Rohner, M. Batzer, P. Maletinsky, and B. J. Shields, "Parabolic diamond scanning probes for single-spin magnetic field imaging," *Phys. Rev. Appl.* **14**, 064007 (2020).

61

N. Waasem, H. Fedder, and P. Maletinsky, "Technology leaps in quantum sensing: Advances in nano magnetometry using tailored electronics and fast-switchable lasers," *Photonics-Views* **18**, 36–39 (2021).

62

S. Chen, W. Li, X. Zheng, P. Yu, P. Wang, Z. Sun, Y. Xu, D. Jiao, X. Ye, M. Cai, M. Shen, M. Wang, Q. Zhang, F. Kong, Y. Wang, J. He, H. Wei, F. Shi, and J. Du, "Immunomagnetic microscopy of tumor tissues using quantum sensors in diamond," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **119**, e2118876119 (2022).

63

T. Zhu, J. Rhensius, K. Herb, V. Damle, G. Puebla-Hellmann, C. L. Degen, and E. Janitz, "Multicone diamond waveguides for nanoscale quantum sensing," *Nano Lett.* **23**, 10110–10117 (2023).

64

D. Kim, M. I. Ibrahim, C. Foy, M. E. Trusheim, R. Han, and D. R. Englund, "A CMOS-integrated quantum sensor based on nitrogen–vacancy centres," *Nat. Electron.* **2**, 284–289 (2019).

65

H. Deguchi, T. Hayashi, H. Saito, Y. Nishibayashi, M. Teramoto, M. Fujiwara, H. Morishita, N. Mizuochi, and N. Tatsumi, "Compact and portable quantum sensor module using diamond NV centers," *Appl. Phys. Express* **16**, 062004 (2023).

66

F. M. Stürner, A. Brenneis, T. Buck, J. Kassel, R. Rölver, T. Fuchs, A. Savitsky, D. Suter, J. Grimm, S. Hengesbach, M. Förtsch, K. Nakamura, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, and F. Jelezko, "Integrated and portable magnetometer based on nitrogen-vacancy ensembles in diamond," *Adv. Quantum Tech.* **4**, 2000111 (2021).

67

S. Maayani, C. Foy, D. Englund, and Y. Fink, "Distributed quantum fiber magnetometry," *Laser Photonics Rev.* **13**, 1900075 (2019).

68

A. Kuwahata, T. Kitaizumi, K. Saichi, T. Sato, R. Igarashi, T. Ohshima, Y. Masuyama, T. Iwasaki, M. Hatano, F. Jelezko, M. Kusakabe, T. Yatsui, and M. Sekino, "Magnetometer with nitrogen-vacancy center in a bulk diamond for detecting magnetic nanoparticles in biomedical applications," *Sci. Rep.* **10**, 2483 (2020).

69

Y. Li, F. A. Gerritsma, S. Kurdi, N. Codreanu, S. Gröblacher, R. Hanson, R. Norte, and T. Van Der Sar, "A fiber-coupled scanning magnetometer with nitrogen-vacancy spins in a diamond nanobeam," *ACS Photonics* **10**, 1859–1865 (2023).

70

J. S. Moon, B. Whitefield, L. Spencer, M. Kianinia, M. Hennessey, M. Toth, W. B. Jeon, J. Kim, and I. Aharonovich, "Fiber-integrated van der Waals quantum sensor with an optimal cavity interface," *Adv. Opt. Mater.* **12**, 2401987 (2024).

71

W.-K. Quan, L. Liu, Q.-Y. Luo, X.-D. Liu, and J.-F. Wang, "Fiber-coupled silicon carbide divacancy magnetometer and thermometer," *Opt. Express* **31**, 15592–15598 (2023).

72

Y. Hatano, J. Shin, J. Tanigawa, Y. Shigenobu, A. Nakazono, T. Sekiguchi, S. Onoda, T. Ohshima, K. Arai, T. Iwasaki, and M. Hatano, "High-precision robust monitoring of charge/discharge current over a wide dynamic range for electric vehicle batteries using diamond quantum sensors," *Sci. Rep.* **12**, 13991 (2022).

73

A. Mzyk, Y. Ong, A. R. Ortiz Moreno, S. K. Padamati, Y. Zhang, C. A. Reyes-San-Martin, and R. Schirhagl, "Diamond color centers in diamonds for chemical and biochemical analysis and visualization," *Anal. Chem.* **94**, 225–249 (2022).

74

N. Aslam, H. Zhou, E. K. Urbach, M. J. Turner, R. L. Walsworth, M. D. Lukin, and H. Park, "Quantum sensors for biomedical applications," *Nat. Rev. Phys.* **5**, 157–169 (2023).

75

K. Arai, A. Kuwahata, D. Nishitani, I. Fujisaki, R. Matsuki, Y. Nishio, Z. Xin, X. Cao, Y. Hatano, S. Onoda, C. Shinei, M. Miyakawa, T. Taniguchi, M. Yamazaki, T. Teraji, T. Ohshima, M. Hatano, M. Sekino, and T. Iwasaki, "Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy," *Commun. Phys.* **5**, 200 (2022).

76

S. Dix, J. Gutsche, E. Waller, G. Von Freymann, and A. Wiedera, "Fiber-tip endoscope for optical and microwave control," *Rev. Sci. Instrum.* **93**, 095104 (2022).

77

Q.-C. Sun, T. Song, E. Anderson, A. Brunner, J. Förster, T. Shalomayeva, T. Taniguchi, K. Watanabe, J. Gräfe, R. Stöhr, X. Xu, and J. Wrachtrup, "Magnetic domains and domain wall pinning in atomically thin CrBr₃ revealed by nanoscale imaging," *Nat. Commun.* **12**, 1989 (2021).

78

J.-P. Tetienne, N. Donschuk, D. A. Broadway, A. Stacey, D. A. Simpson, and L. C. L. Hollenberg, "Quantum imaging of current flow in graphene," *Sci. Adv.* **3**, e1602429 (2017).

79

Q. Liu, S. Nie, X. Peng, Y. Zhu, N. Wang, Y. Hu, X. Luo, C. Li, M. Jing, C. Zhang, W. Liu, H. Chen, J. Cheng, and Z. Wu, "Fiber-Integrated diamond quantum sensor for high-voltage current measurements," *Adv. Sensor Res.* 2400106 (2024).

80

W. S. Huxter, M. L. Palm, M. L. Davis, P. Welter, C.-H. Lambert, M. Trassin, and C. L. Degen, "Scanning gradiometry with a single spin quantum magnetometer," *Nat. Commun.* **13**, 3761 (2022).