스핀트로닉스

다이아몬드 색 중심의 스핀상태 제어

DOI: 10.3938/PhiT.19.039

Coherent Manipulation of the Spin in Diamond Color Center

Mahn-Soo CHOI and Tai Hyun YOON

A nitrogen-vacancy (NV) center in diamond consists of a nitrogen atom substituting a carbon atom and a vacancy trapped adjacent to the substitutional nitrogen. In its ground state, the negatively charged NV center has a spin triplet, which is separated by optical transitions from the excited states. In many respects, the NV center closely resembles an atom affixed in solid, with a long spin coherence time and extremely sharp optical transitions even at room temperatures. Its high fluorescence quantum yield and exceptional photostability promise various applications in quantum optics. More interestingly, the long spin coherence time and fairly easy optical initialization and read out of the ground spin state make the NV center an excellent candidate system for quantum information processing and quantum information storage. Indeed, the coherent manipulation of the single spin or multiple spins of electrons and nuclei within a single NV center have been demonstrated experimentally in several recent works. In this article, we briefly review the intriguing electronic structure of the diamond NV center and its possible applications as a spintronic device from the perspectives of optics, atomic physics, solid-state based quantum information science.

저자약력

최만수 교수는 포항공과대학교 이학박사(1998)로서, 스위스 바젤대학 연구 원, 고등과학원(KIAS) 연구원을 거쳐, 2002년부터 고려대학교 물리학과 교 수로 재직 중이다. (choims@korea.ac.kr)

윤태현 교수는 한국과학기술원 이학박사(1999)로서, 미국 JILA 연구원, 한 국표준과학연구원 책임연구원, 창의사업단 "광주파수제어연구단" 단장을 거쳐 2005년부터 고려대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (thyoon@korea.ac.kr) 최 만 수·윤 태 현

들어가면서

스핀(spin)은 전하나 질량과 같이 기본 입자(elementary particles)의 고유 성질 중의 하나다. 단일 스핀의 양자 상태 를 제어하기 위해서는 우선 스핀을 띠고 있는 기본 입자를 공간상의 일정한 영역에 붙잡아 둘 수 있어야 한다. 전자와 같이 매우 작은 기본 입자를 공간상에 어떻게 붙잡아 둘 수 있을까?

전통적으로는 전자를 속박하고 있는 원자나 이온 또는 단 일 전자를 자기적 방법 혹은 광학적 방법으로 포획(trap)하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 기술적으 로 어려울 뿐만 아니라 극저온을 요구하며 포획된 원자가 포 획 퍼텐셜 내에서 여전히 움직이고 있어 도플러 효과 등 여 러 가지 부작용(side effects)을 고려해 주어야 한다.

최근에는 나노제작 기술의 발달로 양자 점을 이용하여 전자 를 붙잡아 두는 방법도 큰 흥미를 끌고 있다.^[1] 특히 이 방법은 고체 계를 이용하기 때문에 제어 기술이 비교적 쉽고 많은 스핀 을 서로 상호작용시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고체 내 강한 스핀-궤도 상호작용 등의 영향으로 스핀의 양자 상태를 보 존할 수 있는 시간이 상대적으로 매우 짧다는 치명적인 단점이 있어, 원자물리학 수준의 정밀도를 기대하기란 불가능하다.

그렇다면 스핀을 상온에서 양자 상태를 유지하면서 고체 내 한 곳에 붙잡아 두는 것은 불가능한 것일까? 그렇지 않다. 불가능해 보이는 이러한 일이 다이아몬드의 색 중심을 이용 하면 가능하다.

색 중심(color center)이란, 결정 구조상의 결함(defect)이다. 고체 결정에는 원자가 규칙적으로 배열해 있는데, 있어야 할 위치에 원자가 없거나 다른 원자로 치환되면 그것은 결정의 결함이 되고, 그 결함 자체가 특정 색깔의 빛을 흡수하는 원 인이 될 때 그 결함을 색 중심이라 한다. 예를 들면, 연수정 (smoky quartz), 진한 청색의 녹주석(beryl)이 이에 해당한다.

REFERENCES

L. Glazman and M. Pustilnik, in *Nanophysics Coherence and Transport*, edited by H. Bouchiat, Y. Gefen, S. Gueron, G. Montambaux and J. Dalibard (Elsevier Science, 2005), LXXXI Lecture Notes of the Les Houches Summer School 2004.



Fig. 1. The features and applications of nitrogen-vacancy center in diamond.

색 중심은 인공적으로 만들어 낼 수도 있다. 전자나 중성자 등 입자를 결정에 부딪치거나 혹은 감마선과 같은 강력한 전 자파를 보석에 쬐여 그 충격으로 결정격자(crystal lattice)에 결함을 만들면, 그 결함들은 많은 경우 색 중심이 된다.

다이아몬드는 탄소 원자가 특정한 구조로 배열된 결정체이 고, 자연 상태의 다이아몬드에도 여러 가지 색 중심이 존재한 다. 가령 탄소가 빠져 빈자리(vacancy)가 생기기도 하고, 탄 소가 질소로 치환되기도 한다. 특히 질소가 탄소를 치환할 때 는 보통 빈자리 바로 옆에 있는 탄소를 치환하는 것이 보통 인데 이때 생기는 질소-빈자리 결함을 **질소-빈자리 색 중심** (nitrogen-vacancy color center)이라 부른다.^[2] 우리가 이 글에서 살펴볼 색 중심이다.

다이아몬드의 질소-빈자리 색 중심이 다른 예에 비하여 스 핀의 양자 상태 제어와 관련하여 특히 큰 관심을 끄는 이유 는 아래와 같다 (그림 1 참조):

- 다이아몬드 질소-빈자리 색 중심의 전자 구조는 바닥상태 에서 양자 상태 엔지니어링에 필수적인 준위 겹침(degeneracy), 즉 스핀 세쌍둥이(triplet)를 갖는다.^[2,3]
- 질소-빈자리에 속한 전자들은 바닥준위와 들뜬상태 준위사 이에 637 nm인 가시광 영역에 좁은 ZPL 전이선(zerophonon transition line)을 가지며 이보다 파장이 짧은 레이저(예, 532 nm 레이저)를 이용하면 바닥준위 전자상 태의 스핀을 초기화하고 또한 스핀상태를 읽어낼 수 있다.
- 다이아몬드를 구성하는 원자인 탄소는(C¹²) 상대적으로 원 자가가 작아 매우 약한 스핀-각운동량 상호작용을 한다. 따라서 스핀이 격자와 잘 분리된 환경을 제공한다.
- 다이아몬드를 구성하는 탄소원자 사이의 강한 결합은 상 대적으로 약한 격자 진동을 일으켜, 상온에서도 열적 요동 이 배제된 마치 저온과 같은 환경을 제공한다.
- 5. 다이아몬드는 전자 스핀과 상호작용을 통해 스핀 결맞음

을 파괴하는 핵스핀을 갖는 C¹³이 상대적으로 적게 존재 하는 시스템이다. 즉 자연에 존재하는 다이아몬드의 경우 도 C¹³은 약 1 % 정도이며 최근에 chemical vapor deposition(CVD)에 의해 성장된 고순도 다이아몬드의 경우는 충분히 전자소자를 제작할 수 있는 수준의 뛰어난 결정도 와 적은 결함 농도를 갖고 있다.

위와 같은 이유로 다이아몬드 질소-빈자리 색 중심의 전자 구 조는 원자물리학 수준의 매우 좁은 선폭을 갖고 있으며, 매우 뛰 어난 순환 천이(cycling transition) 특성과 형광(fluorescence) 특성을 갖고 있다. 이러한 사실들은 이미 실험을 통해 잘 검 증 되었다.^[4-7] 이 글에서는 이와 같이 독특한 전자 구조와 스 핀 상태를 갖는 다이아몬드 질소-빈자리 색 중심을 소개하고 그 응용 가능성과 전망을 알아보기로 한다.

질소-빈자리 색 중심의 전자 구조

질소-빈자리 색 중심의 스핀 상태를 광학적 방법과 마이크 로파 기술을 이용하여 제어하기 위해서는 질소-빈자리 색 중 심의 전자 구조, 특히 전자 궤도 함수의 대칭성과 스핀 함수 를 이해하는 것이 중요하다. 이 절에서는 다이아몬드 질소-빈 자리 색 중심의 대칭성과 그에 따른 군론(group theory)적 고찰을 통하여 궤도 함수와 스핀 함수의 특성을 살펴본다.

탄소원자가 규칙적으로 배열되어 있는 다이아몬드 결정체에 도 다른 결정구조와 마찬가지로 여러 가지 결함이 존재하는데 결정 구조 상의 탄소 원자가 빠진 것이 그 하나이다. 이러한 결함은 빈자리(vacancy)라 한다. 어떤 탄소 원자는 다른 원자, 특히 질소 원자로 치환되는 경우가 있는데, 질소 원자는 탄소 원자에 비하여 최외각 전자가 하나 더 많기 때문에 홀로 있기 보다는 빈자리(vacancy)를 찾아 그 바로 옆자리에서 앉는 것

REFERENCES

- [2] N. B. Manson, J. P. Harrison and M. J. Sellars, Phys. Rev. B 74, 104303 (2006).
- [3] P. Tamarat, N. B. Manson, J. P. Harrison, R. L. McMurtrie, A. Nizovtsev, C. Santori, R. G. Beausoleil, P. Neumann, T. Gaebel, F. Jelezko, *et al.*, New J. Phys. **10**, 045004 (2008).
- [4] L. Childress, M. V. Gurudev Dutt, J. M. Taylor, A. S. Zibrov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, P. R. Hemmer and M. D. Lukin, Science **314**, 281 (2006).
- [5] P. Neumann, N. Mizuochi, F. Rempp, P. Hemmer, H. Watanabe, S. Yamasaki, V. Jacques, T. Gaebel, F. Jelezko and J. Wrachtrup, Science **320**, 1326 (2008).
- [6] G. Davies and M. F. Hamer, Proc. R. Soc. London A 348, 285 (1976).
- [7] A. Lenef, S. W. Brown, D. A. Redman, S. C. Rand, J. Shigley and E. Fritsch, Phys. Rev. B 53, 13427 (1996).



Fig. 2. Diamond crystal lattice structure.

이 안정적이다. 이러한 질소-빈자 리 결함 구조를 질소-빈자리 색 중 심(nitrogen-vacancy color center) 혹은 질소-빈자리 중심(NV center)이라 부른다.

다이아몬드의 결정은 그림 2와 같이 대표적인 면 중심(FCC; face centered) 등축정계(cubic crystal system) 구조를 이루고 있어, 정사면체(tetrahedron)와 같은 대

칭성을 갖고 있다. 이러한 대칭성을 결정 구조 점 군론(point group) 기호로 T_a라 나타낸다. 다이아몬드 결정구조에 질소-빈자리 중심이 생기면 정사면체 대칭성의 일부는 깨지고 질 소와 빈자리를 잇는 축을 중심으로 한 회전 및 반사 대칭성 만 남아, 정삼각형의 대칭성과 유사한 C₃, 대칭성을 갖게 된 다.

질소-빈자리 색 중심의 총 전자 개수에 대해 그 동안 여러 주장이 제기되었으나, 최근 홀 버닝(hole burning) 실험 등을 통하여 탄소와 질소 원자가 제공하는 최외각 전자보다 하나 가 더 많아 음 전하를 띠고 있다는 주장이 점차 정설로 자리 잡아가고 있다.^[8] 즉 질소-빈자리 색 중심에는 총 6개의 전자 가 속박되어 있다.¹¹ 질소-빈자리 색 중심의 빈자리와 결합된 탄소 원자 및 질소 원자의 s 궤도와 p 궤도를 고려하면 한 질소-빈자리 색 중심에 스핀 포함 총 8개의 에너지 준위가 존재하는데, 이 중 6개가 전자에 의해 채워지고 나머지 2개 의 궤도가 비어 있게 된다. 따라서 8개의 궤도가 모두 채워져 있는 전자 구조를 기준으로 볼 때, 질소-빈자리 색 중심은 2 개의 홀(hole)을 갖고 있는 셈이다. 이 글에서는 질소-빈자리 색 중심을 2개의 홀로 기술하는 관점을 택한다.

질소-빈자리 색 중심의 해밀토니안(Hamiltonian)은 크게 3 개의 항으로 이루어져 있다: $H=H_{crystal}+H_{fine}+H_{stress}$. 여기서 $H_{crystal}$ 은 탄소 및 질소 이온의 쿨롱 퍼텐셜과 빈자리의 퍼텐 셜 그리고 전자 간 쿨롱 상호작용을 포함하는 항으로, 전자의 궤도 함수를 결정하는 주된 항이다. H_{fine} 은 스핀-궤도 상호작 용과 스핀-스핀 상호작용을 포함하고 있으며, 궤도 함수와 스 핀 함수의 미세 구조(fine structure)를 결정한다. 마지막으로 H_{stress} 는 결정 구조의 비틀림이나 외부 전기장 등의 요인으 로 발생하는 결정 구조의 스트레스에 의한 영향을 기술하며, 전자 준위 간 전이 특성을 제어하는 데 유용하게 쓰일 수 있 다. $C_{3\nu}$ 대칭성에 의해 단일 전자 궤도 함수는 A_1 , A_2 , 그리 고 E 궤도 중 하나이어야 한 다. H_{crystal} 항만 고려할 경우 바닥상태 궤도 함수는 A₂ 궤 도로 주어지며 스핀 함수는 스 핀 세쌍둥이(triplet)를 이룬 다. 그래서 바닥상태의 전자 준위는 원자물리학의 기호를 따라 ³A₂라고 표시한다. 바닥 상태와 결맞음 전이를 보이 는 들뜬상태 궤도 함수는 E 궤도이며 스핀은 바닥상태와 마찬가지로 세쌍둥이를 이루 며, 기호로는 ³E로 표시한다. 두 준위 사이의 에너지 차는



Fig. 3. Lattice structure around a nitrogen-vacancy center in diamond. Red, blue, and white spheres indicate the carbon atom, nitrogen atom, and vacancy, respectively.

637 nm 레이저 빛에 해당한다. 바닥상태 ³A2와 들뜬상태 ³E 사이에 홑 스핀(spin singlet)인 ¹A1 준위와 ¹E 상태가 각각 존재하는데, 최근 레이저 분광학 실험에 의해 그들의 정확한 에너지 관계가 알려지게 되었다. 즉, 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 ¹E 상태가 ¹A₁보다 1042 nm 높은 에너지를 가지고 있다.^[9] 여기에 H_{fine}항, 즉 스핀-궤도 상호작용과 스핀-스핀 상 호작용을 고려하면 궤도 함수와 스핀 함수를 더 이상 구분할 수 없고, 두 함수가 결합된 스핀-궤도 함수만을 정의할 수 있 다. 이때 바닥상태는 스핀 세쌍둥이가 A1 스핀-궤도 함수와 E 스핀-궤도 함수로 분리되며, 두 준위 사이의 에너지 차이는 2.88 GHz 마이크로파에 해당된다. ³E 들뜸 상태는 좀 더 복 잡한데, 위에서부터 A1, A2, E', E 스핀-궤도 함수를 갖는 준 위들이 차례로 위치하고 있다.²⁾ 이 중 E' 스핀-궤도 함수는 스 핀 양자 수가 0으로 스핀 함수와 궤도 함수가 얽혀 있지 않 고, 다른 함수들은 스핀 함수와 궤도 함수가 얽혀 있다. 특히 A1 스핀-궤도 함수는 바닥상태 E 스핀-궤도 함수와 스핀-궤도 얽힘 상태가 유사하여 광학적 천이를 통해 스핀 상태를 결맞 음 제어하는데 매우 유용하다.

질소-빈자리 색 중심의 스핀 제어

다이아몬드 질소-빈자리 색 중심이 다양한 양자 상태 제어 에 쓰일 수 있는 가장 중요한 이유 중의 하나는 바닥상태에

REFERENCES

- [8] C. Santori, D. Fattal, S. M. Spillane, M. Fiorentino, R. G. Beausoleil, A. D. Greentree, P. Olivero, M. Draganski, J. R. Rabeau, P. Reichart, *et al.*, Opt. Express **14**, 7986 (2006).
- [9] V. M. Acosta, A. Jarmole, E. Bauch and D. Budker, arXiv: 1009.0032.

¹⁾ 여분의 전자가 근원에 대해서는 알려진 것이 없으나 다이아몬드 내 다른 결함에서 제공된 것으로 추측되고 있다.

²⁾ E'와 E 스핀 궤도 함수는 대칭성만으로 볼 때 같은 함수이지만, 서 로 구별하기 위해 다른 기호를 사용한다.



Fig. 4. The energy-level structure of the nitrogen-vacancy center. A_1 , A_2 , E are the point-group notations of the orbital or spin-orbital wave functions of the levels.

서 에너지 준위가 겹쳐 있다는 것이다. 좀 더 정확히 말하면, 위에서 언급한 것처럼, 스핀 세쌍둥이(spin triplet)를 이루고 스핀-스핀 상호작용에 의해 2.88 GHz 마이크로파에 해당되 는 미세한 에너지 차만큼 분리되어 있다. 가장 낮은 준위에 해당하는 A_1 스핀-궤도 함수는 스핀 각운동량이 0(스핀 함수 가 S₂)이며 *E* 스핀-궤도 함수는 궤도 각운동량은 0이고 스핀 각운동량이 ±1이다. 따라서 바닥상태 스핀 세쌍둥이 상태를 양자 제어하기 위해서는 이 두 준위 사이의 전이를 잘 제어 할 수 있어야 한다.

우선 가장 첫 단계로 바닥상태 스핀 편극(polarization)을 얻는 방법부터 알아보자.^[4,5] 바닥상태 에너지 준위 차는 매우 적어 일반적으로 상온에서 스핀은 세 준위에 고루 분포하고 있다. 여기에 637 nm 혹은 그보다 에너지가 높은 레이저 빛 을 쏘아 주면 색 중심은 바닥상태에서 들뜬 상태로 전이한다. 이때 E 스핀-궤도 함수는 들뜬 상태 E', E, A2 스핀-궤도 함수 로 천이하는데 이들 스핀-궤도 함수들은 스핀-궤도 상호작용 에 의해 중간 상태(intermediate levels) ¹E 홑 스핀과 강하게 결합되어 있다. 따라서 들뜬 상태에 있던 홀들은 ¹E 중간 상태 로 빠르게 전이하며 ¹E 상태에서 A₁ 상태로 1042 nm 근적외 선 빛을 방출하면서 연속적으로 빠르게(<1 ns) 전이하고 이 어서 수백 ns 이후에 바닥상태로 빛을 방출하지 않는 전이를 한다.^[9] 이때 중간 상태의 전자들은 스핀 각운동량이 0이므로 역시 스핀 각운동량이 0인 바닥상태의 A1 스핀-궤도 함수로 전이한다. 이렇게 바닥상태 E 스핀-궤도 함수에 놓여 있는 홀 들은 시간이 지남에 따라 모두 A1 스핀-궤도 함수로 옮겨가게 되어 스핀 편극을 얻을 수 있다. 이 과정은 상온에서도 그 효

율이 98% 이상으로 매우 높아 응용 가능성이 굉장히 크다.^[4,5] 위의 방법으로 스핀 편극된 질소-빈자리 색 중심은 여러 가지 스핀 상태를 생성하고 제어하는데 이용할 수 있다. 현 재 널리 쓰이고 있는 방법은 2.88 GHz 마이크로파를 이용하 여 직접 A_1 스핀-궤도 함수와 E 스핀-궤도 함수 사이의 중첩 을 제어하는 방법이다. 마이크로파를 이용한 라비 진동(Rabi oscillation)으로 단일 색 중심의 스핀 제어가 실험적으로 구현 되었을 뿐만 아니라, 최근 초전도 회로공명장치(circuit QED), 나노진동자(nanomechanical oscillator) 등을 이용한 여러 색 중심을 결합할 수 있는 방법들이 이론적으로 제안되고 있 다.^[10,11] 그러나 이 방법은 스핀 각운동량이 ±1인 두 E 스핀 -궤도 함수의 상대적인 중첩 정도를 제어하기 어렵다는 단점 이 있다.

질소-빈자리 바닥상태 스핀을 제어하기 위하여 광학적 방법 도 널리 쓰이고 있다. 이 방법은 바닥상태와 들뜬 상태의 광 학적 천이를 이용한다. 우선 마이크로파 펄스를 이용하여 바 닥상태 A1 스핀-궤도 함수에서 바닥상태 E 스핀-궤도 함수로 천이한 다음, 637.49 nm 레이저를 이용하여 다시 들뜬 상태 A1 스핀-궤도 함수로 천이하는 방법이다.^[3,5,12] 이때 (³A₂)E-(³E)A₁ 천이에 쓰이는 레이저 빛이 원형 편광되어 있을 경우, 그 편 광 방향에 따라 스핀 각운동량(±1)이 서로 다른 준위 사이의 상대적인 중첩 정도를 정밀하게 제어할 수 있다. 이것은 광학 적 천이는 각운동량 보존의 법칙에 따라 일정한 궤도 각운동 량 변화(±1)만 허용된다는 선택규칙(selection rule)을 만족 시켜야 하기 때문이다. 즉 시계방향으로 원형 편광된 빛은 (³A2)E 준위의 스핀 상태 중 스핀 각운동량이 +1인 상태만 (³E)A1와 결합시킬 수 있으며 반시계 방향으로 원형 편광된 빛은 스핀 각운동량이 -1인 상태만 (³E)A₁와 결합시킬 수 있 다. 최근 이런 방법을 이용하여 질소-빈자리 색 중심의 스핀 과 단일 광자의 편광 상태의 양자 얽힘을 성공적으로 구현한 실험 결과가 발표되었다.^[5,12]

응용 및 전망

20세기 이후 양자역학의 눈부신 발전에도 불구하고 아직 양 자광학, 양자정보 및 원자물리 분야에서 제안된 많은 양자물리

REFERENCES

- [10] P. Rabl, P. Cappellaro, M. V. G. Dutt, L. Jiang, J. R. Maze and M. D. Lukin, Phys. Rev. B 79, 041302 (2009).
- [11] P. Rabl, S. J. Kolkowitz, F. H. L. Koppens, J. G. E. Harris, P. Zoller and M. D. Lukin, Nat. Phys. 6, 602 (2010).
- [12] E. Togan, Y. Chu, A. S. Trifonov, L. Jiang, J. Maze, L. Childress, M. V. G. Dutt, A. S. Sorensen, P. R. Hemmer, A. S. Zibrov, *et al.*, Nature **466**, 730 (2010).

원리들이 실용화되지 않고 있다. 이는 상온과 중시 세계에서 양자 결맞음 현상이 오래(ms 이상) 유지되는 고체 물질계를 찾지 못하고 있기 때문이다. 실제로 최근 많은 연구자들이 다 양한 과학기술 분야에서 기초과학의 응용을 최적화하기 위해 새로운 중시 및 거시 양자 물질계와 원리를 찾고 있다. 예를 들면, 나노과학 분야에서는 차세대 고밀도 메모리 반도체, 생 명물리 분야에서는 생체 이미징 원리, 진단방법, 치료기술 등 의 방면으로, 정보과학분야에서는 양자정보처리 원리, 양자암 호 전송, 양자전산 시스템 개발 등으로 진행되고 있다. 현재까 지 과학기술의 전반적인 분야에서 진행된 연구결과를 놓고 볼 때, 위와 같이 상온에서 작동하는 양자 물질계로 가장 가능성 이 높은 고체 물질 중의 하나가 바로 다이아몬드 색 중심이라 고 할 수 있다. 이 절에서는 앞 절에서 살펴본 다이아몬드 질 소-빈자리 색 중심의 전자 구조 및 양자역학적 특성에 대한 물 리학적, 기술적 활용 가능성과 발전 전망을 알아보기로 한다.

초고속 단일광자 광원 개발 및 Si MPPC 단일광자 검출기를 이 용한 양자광학. 상온 다이아몬드 색 중심의 전자 구조는 앞에 서 살펴 본 것처럼 이상적인 단일광자 광원을 만들 수 있는 에너지 구조를 가지고 있다. 즉 637 nm 레이저를 이용 바닥 상태의 스핀을 스핀 각운동량 0으로 편극시킬 수 있으며 [그 림 4 참조], 1 MHz 이상의 반복율을 가진 단일광자 광원을 만들 수 있다. 이렇게 제작된 단일광자 광원은 Si 기반 MPPC 단일광자 검출기로 검출하고 광섬유 또는 공기 중에서 먼 거리 떨어진 장소로 양자암호전송과 같은 실질적인 양자 정보 기술응용에 활용할 수 있다.^[5] 또한 최근에는 다이아몬 드에서 Ni 또는 Si 색 중심이 단일광자 광원으로서의 활용 가능성이 제안되었고 실제 일부 이미 상용화된 경우도 있다.

고체 기반 cavity QED(quantum electrodynamics) 이론 및 실 험. 단일광자와 물질을 결맞게(coherently) 결합할 수 있는 가 장 잘 알려진 모델이 cavity QED 모델이다. Cavity QED 모 델을 구현하는 대표적인 시스템은 원자를 빛의 공진기 안에 포획하는 것으로, 현재까지 수많은 양자광학과 원자물리 연구 의 대상이었다. 그러나 원자-광자 공진기 시스템은 우선 (i) 원자 포획이 어렵거나 포획 시간이 한정되어 있고, (ii) 광자-원자 결합상수가 작다는 단점 때문에 여러 가지 제한적인 요소가 있었다. 다이아몬드 색 중심은 잘 보존된 대칭성에 기인하고 원자에 버금갈 만큼 잘 정의된 전자 구조를 갖고 있어 포획 원자를 대신하여 단일광자-물질 상호작용을 결맞게 구현할 수 있는 획기적인 시스템을 제공할 것으로 기대된다. 더 나아가 색 중심 특유의 바닥상태 전자 구조는 광학적 영역(optical range)뿐만 아니라 마이크로파(microwave) 영역에서도 cavity QED를 구현할 수 있게 해 준다.

상온 다이아몬드 색 중심의 원자 분해능 전자기유도 양자 결맞 음 제어, 다이아몬드 질소-빈자리 색 중심은 그림 4에서 보인 것처럼 바닥상태가 2.88 GHz로 스핀-스핀 상호작용으로 분 리되고 637 nm에 좁은 선폭의 ZPL(zero phonon line)을 갖 는 이상적인 3준위 구조를 가지고 있다. 질소-빈자리 색 중심 의 이러한 스핀 구조는 최근에 제안된 전기쌍극자와 자기쌍 극자 전이가 가능한 2전자 3준위 에너지 구조에서 전자기 유 도 투과, 흡수 및 chirality 현상을 단일스핀 영역에서 연구할 수 있게 해 준다. 637 nm에서 2.88 GHz로 주파수 차이를 갖는 두 레이저의 위상을 동기한 후 Λ-구조의 3준위 상호작 용을 이용 조사빔의 EIT, EIA, 및 EIC(electromagnetically induced chirality) 현상을 가시광 파장 영역에서 연구할 수 있을 것이다. 또한 스핀-스핀 상호작용에 의해 바닥상태가 2.88 GHz로 분리된 다이아몬드 단일 질소-빈자리 색 중심을 모드록된 637 nm 반도체 레이저를 광원으로 사용하여 원자 물리 수준의 분해능을 갖는 고분해능 레이저 분광기술과 레 이저 자기공명방법을 응용하여 단일 질소-빈자리 색 중심에 대한 바닥상태와 여기상태의 에너지 준위 구조를 정밀하게 측정할 수 있을 것이다.

나노스케일 공간 및 자기장 분해능 다이아몬드 단일 색 중심 far-field nanoscopy. 광학적 방법만으로도 단일 다이아몬드 색 중심을 이용한 양자제어 연구 실험이 가능하다. 그러나 이 러한 실험을 위해서는 단일스핀센터의 광학적 이미지를 회절 한계인 λ/2=300 nm를 10배 이상 뛰어넘는 약 20 nm 공 간분해능으로 confocal 영상장치를 먼저 개발해야 한다. 이러 한 far-field nanoscopy 기술의 일종인 STED 및 GSD 형광 영상법은 독일 Max-Plank 연구소의 Hell 그룹에서 2009년 에 발표하여 그 가능성은 충분하다. 광학적 자기공명 방법으 로 외부자기장에 의해 분리되는 다이아몬드 나노입자에 존재 하는 단일 색 중심의 스핀상태를 측정하면 약 μT의 감도로 외부자기장의 크기를 측정할 수 있다. 이러한 초감도 자기장 측정 방법을 최고의 공간 분해능을 갖는 scanning probe microscopy(SPM) 기술과 결합하면 나노미터의 공간 영역에 서 미세한 자기장의 변화를 측정할 수 있다. 더 나아가 단일 색 중심의 스핀-에코 현상을 이용하면 nT/Hz^{1/2}의 자기장 측 정 민감도를 확보할 수 있으며, 이는 단일스핀의 자화 값에 비견되는 수준으로 나노스케일의 공간 분해능이 결합되면, 단 일 전자의 자기모멘트를 직접 실험으로 측정할 수 있는 현대 물리의 혁명적인 실험 가능성을 제공할 것으로 기대된다.