단분자를 이용한 단광자 소스 개발

DOI: 10.3938/PhiT.22.048

이 광 겔

Developing a New Quantum Light Source: Single Photons from Single Molecules

Kwang-Geol LEE

In this article, a new kind quantum light source, a single photon source, is introduced. In contrast to other pre-existing light sources, the single photon source enables us to 'get' single photons on demand. This is a truly remarkable merit of the single photon source, so that source has been discussed as the building block of many quantum optical applications like quantum cryptography, optical quantum computation, quantum imaging, and metrology. However, the feasibility of these applications depends on the availability of single photons with a high fidelity. Here, the generation mechanism for single photons from nano-sized single emitters and several cutting edge technologies to enhance the 'quality' of single photon sources are discussed.

서 론

빛을 이용하는 광기술의 발전은 인류역사 전반에서 큰 영향력을 발휘하여 왔다. 그 중 빛의 이해를 바탕으로 한 광소스의 개발은 과학사의 발전에 크게 이바지한 바 있다. 대표적으로 20세기 초반부터 한 세기를 아우르는 양자역학의 발전에서 기본 개념의 확립과 가설을 검증하는데 있어 빛을 이용한 실험들이 중추적인 역할을 담당하였다. 이는 대표적인 광소스인 레

이저의 개발에 힘입은 바 크며, 레이저의 기본 개념은 1917년 아인슈타인에 의해 제시된 후, 1960년대에 이르러 Maiman에 의해 최초로 가시광 영역에서 발전하는 레이저가 실현되었다. 레이저는 유도 방출(stimulated emission)을 통한 빛의 증폭 과정을 통해 만들어지며, 방출되는 빛은 높은 직진성, 안정성과 더불어 높은 결맞음성을 지니게 된다. 이런 뛰어난 특성을 바탕으로 레이저는 과학연구 분야에서 뿐 아니라 의료, 군사, 산업, 그리고 오늘날의 최첨단 기술의 하나인 광통신에서까지 절대적인 역할을 수행하고 있다. 최초의 레이저가 겨우 50여 년 전에 개발된 것을 생각해 볼 때, 이는 좋은 광소스의 개발이 사회전반에 얼마만큼의 큰 영향을 끼칠 수 있는지 잘 보여준다. 하지만 최근의 나노, 바이오 및 양자 응용에 대한 연구에서는 레이저를 포함한 기존의 광소스들이 가지지 못하는 성능을 가지는 차세대 광소스의 개발을 필요로 하고 있다. 본 고에서는 단광자 소스의 필요성과 특성에 대하여 논의하고 단분자를 포함한 단광자 발생기에서의 광자 방출 메커니즘과 단광자 소스의 품질을 향상하는 데 있어서 개발되고 있는 광기술들에 대해 알아보도록 한다.

레이저의 한계점과 단광자 소스의 가능성

하나의 광자(photon)를 원하는 타이밍에 생성할 수 있을까? 이는 레이저를 포함하는 기존의 광소스들과 단광자 소스의 차이점을 가장 극명하게 보여주는 질문이며, 또한 오랫동안 제시되어 왔던 다양한 양자광 응용기술(양자 암호(Quantum Key Distribution), 양자 전송(Quantum Teleportation), 양자 연산(Quantum Computing))들을 실현하는데 있어 절대적으로 요구되는 사항이다. 하지만 레이저를 포함한 기존의 광소스로는 이를 실현하는 것이 불가능하다.

유도 방출(Stimulated Emission)을 통해 생성되는 레이저의 경우 광자들은 서로 동일한 물리적 상태(진행 방향, 파장, 편광 및 위상)를 지니게 된다. 여기서 레이저가 가지는 결맞음성, 즉 발생하는 광자들이 서로 동일한 위상 값을 지니게 됨으로써

저자약력

이광겔 교수는 서울대학교 이학박사(2007)로 스위스 쾰리히 연방공과대학교(ETHZ)(2008-2010)와 독일 엘랑겐 소재 막스플랑크 연구소(2010-2011)에서 박사 후 연구과정을 거치고, 2012년부터 한양대학교 물리학과 조교수로 재직 중이다. (kglee@hanyang.ac.kr)

Fig. 1. Sequence of photons from laser (a) and single photon emitter (b).

레이저는 하나의 특수한 물리적 성질을 가지게 된다. 그것은 레이저에서의 광자 방출 타이밍이 무작위로 결정된다는 것이다. 위상이 정확히 결정된다는 것은 위상 함수가 전 공간에서 정확히 결정된다는 의미이므로, 광자의 위치 즉 광자가 발생하는 시점에 대한 정보를 완전히 상실하게 된다. 이것은 위상과 발생하는 광자의 수가 동시에 정확히 측정될 수 없다는 것으로, 하이젠버그의 불확정성 원리의 또 하나의 예가 된다.^[1] 또한 결맞음성이 높은 레이저(coherent state)의 경우 발생하는 광자 수는 푸아송 분포(Poissonian distribution)를 따르며, 한 번에 두 개 이상의 광자가 동시에 방출되는 경우가 존재하게 된다 (Fig. 1(a)). 램프 및 흑체복사를 비롯한 고전적 광소스의 경우에는 여러 개의 광자를 동시에 얻을 확률이 레이저의 경우보다 더 높아지게 되며(이를 광자들이 뭉쳐있는 상태, bunched state라 한다), 광자의 발생 시점을 조절하는 것 또한 불가능하다. 그에 비해 단분자(single molecules)를 포함하는 단광자 발생기를 이용하면 한 번에 하나씩의 광자를 방출시키는 것이 가능해지며(anti-bunched state), 단광자 발생기의 여기 타이밍을 조절하면 방출되는 광자의 배열 또한 임의대로 조절하는 것이 가능해진다 (Fig. 1(b)).

레이저에 비하여 시간 축에서 더 균일하게 광자가 분포된 상태를 진폭-축퇴(amplitude squeezed) 상태라 부르며 빛의 세기의 정확도가 향상된 상태를 나타낸다. 이 경우 불확정성 원리에 의해 광자들간의 상대적인 위상 정보에 대한 오차는 증가하게 된다.

응용분야

단광자 발생기에서의 광자 방출 메커니즘을 논하기 앞서 단광자 소스를 접목할 수 있는 응용분야에 대하여 우선 논의하도록 한다. 앞서 기술하였듯 이들 양자 광기술에는 여러 가지가 있으나 현재 시점에 있어 상대적으로 실현 가능성이 높게 점쳐지고 있는 분야들 중 두 가지에 대하여 간단히 기술하도록 한다.

Fig. 2. (a) Hanbury-Brown and Twiss setup for measuring photon correlation. Histogram of detection time interval between two detectors. (b) Laser(coherent state): random emission timing of photons - no correlation. (c) Thermal lights(bunched state): photons tend to get together. (d) Single photon source(anti-bunched state): no case of having more than one photon.

1. 양자 암호(quantum key distribution)

오늘날 광통신의 발달로 말미암아 많은 정보량을 빠르게 전달하는 것이 가능해졌다. 대륙간을 연결하는 해저 광케이블이 설치되었고 일반 가정에서도 광통신의 혜택을 누릴 수 있게 되었다. 대용량, 초고속 정보화 시대에서 또 하나의 중요한 요구사항은 정보 전달에 있어서의 안정성이다. 군사 작전 및 일상생활에서의 금융 활동에서 쉽게 생각해 볼 수 있듯이 암호(보안키)를 외부로 유출시키지 않고 상대방에게 전달하는 능력은 매우 중요하다. 하지만 이제까지의 고전적 암호 체계로는 보안성의 엄밀성이 보장되지 못한다. 제 3자가 암호를 해독하는 것이 어려울 뿐이지 해독 자체가 불가능한 것이 아닌 것이다. 그에 비하여 양자의 큐비트(qubit)을 정보 매개체로 사용하는 양자 암호에서는 이론적으로 완벽하게 안전한 정보전달을 보장할 수 있다. 이는 양자 상태의 복제 불가능성(no cloning the-

REFERENCES

- [1] Mark Fox, *Quantum Optics* (Oxford Univ. Press).

orem)에 기초하게 되는데, 누군가 암호 해독을 시도하는 순간 원래의 양자 상태를 교란시키게 되어 필연적으로 원 정보(암호)에 변화를 수반하게 된다. 정보전달을 시도하는 당사자들은 그 변화량을 체크함으로써 정보 탈취(해킹)의 시도가 있었는지의 여부를 알 수 있으며, 해킹의 시도가 없었던 경우에 전달된 정보를 암호(보안키)로 사용하게 된다.^[2] 여기서 하나의 큐비트라 함은 광자를 사용하는 경우, 광자 하나의 유무(광자 하나가 있을 때: 1, 없을 때: 0)나, 광자 하나가 가지는 편광 방향(예를 들어 수직 편광: 1, 수평 편광 0)을 이용하여 정보를 구성할 수 있다. 이 경우 광자 하나를 필요한 배열로 생성하거나 광자 하나의 편광을 임의의 방향으로 재단할 수 있는 능력이 절대적으로 요구된다. 기존의 광소스를 활용한 암호 전달 기술들이 개발되어 있으나, 기존 광소스는 앞서 기술하였듯 광자 하나의 상태를 조절할 수 없기 때문에 정보전달에 있어 필연적으로 오차가 수반되며 복잡한 오차 처리 알고리즘이 필요하게 된다. 결과적으로 높은 신뢰도를 가진 단광자 소스가 빛을 이용한 양자 암호 기술에서의 최종 해결책이 될 것이다.

2. 양자 이미징(quantum imaging)

샘플에서의 산란/흡수/반사를 통해 손실되는 빛을 측정하여 물질 특성을 연구하는 광학현미경은 생물, 의학, 재료 등 거의 모든 자연과학과 응용기술 연구에서 필수적인 도구로 활용되고 있다. 이는 타감지기술과 비교했을 때 상대적으로 사용방법이 간단하며, 비파괴적인 방법으로 샘플 표면과 내부 구조 및 기작에 대한 연구가 가능하기 때문이다. 광학현미경에서 요구되는 두 가지 중요한 사항은, 분해능을 높이고 측정 감도를 향상시키는 것이다. 빛의 회절 한계에 의해 제한되는 분해능을 향상시키는 방법으로 STED, Localization microscopy (PALM, STORM)를 비롯한 다양한 기술들이 개발되어 왔으며, 현재 원거리 광학현미경(far-field microscopy)이 도달하고 있는 분해능은 수십 나노미터 수준이다.^[3] 또한 측정 감도 측면에서는 투과현미경으로 상온에서 수 나노미터 크기의 단분자를 감지하는 수준에 이르고 있다.^[4]

최근의 나노-바이오 분야를 살펴보면, 생체분자와 세포 내부 구조체의 형태를 밝히는 데는 수십 나노미터 이하의 이미징 분해능이 요구되며, 생체분자간 상호 기작을 연구하는데 있어서는 초고감도 실시간 측정방법이 요구된다. 대부분의 경우 생물 조직은 빛에 대해 투명하기 때문에, 발생하는 광신호 자체가 아주 미약하다. 이런 경우 신호를 감지할 수 있는 충분한 크기의 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)를 얻기 위해서는 측정 시스템에서의 배경잡음을 완전히 제거할 수 있어야 한다. 이제까지 개발된 광기술로 대부분의 배경잡음을 제어하는 것이 가능해졌다. 하지만 레이저를 포함한 기존의 광소스 자체가 태

Fig. 3. Ultra-sensitive imaging: comparison between randomly distributed and regular photon stream.

생적으로 지나는 샷-노이즈(Shot-Noise)는 어떠한 고전적인 기술로도 제거할 수 없으며 현재의 측정감도의 한계를 결정짓고 있다. 샷-노이즈는 앞서 기술한 대로 기존의 광소스에서 발생하는 광자(photon)들의 발생 타이밍을 조절할 수 없다는 데에 기인한다. 시간상에서 무작위적으로 배열된 광자의 흐름은 광신호세기에 요동을 가져오게 되며 결과적으로 도달할 수 있는 신호대잡음비의 한계를 결정하게 된다. 기존의 광소스 중 가장 작은 샷-노이즈를 제공하는 것이 레이저인데 광신호의 세기가 n 이라면 $\sqrt{n}$ 크기의 샷-노이즈를 가지게 된다. 예를 들어 초당 100개의 광자가 발생할 경우, 10 정도의 오차를 수반하게 되는 것이다. 하지만 만일 광자들을 시간축에서 균일하게 분포시킬 수 있다면 샷-노이즈는 0의 값으로 수렴하게 되며, 이 경우 무한대의 신호대잡음비를 얻을 수 있다. 이를 이용한 것을 양자 이미징(또는 sub-ShotNoise Detection)이라 하며, 결과적으로 수 나노미터 크기의 단분자를 넘어 단원자 감지 수준의 측정 감도를 실현할 수 있게 되는 것이다.

이외에도 양자 연산(quantum computing), 양자 전송(quantum teleportation), 양자 양초(quantum candle) 등의 다양한 응용 분야가 있다.^[5,6]

단광자 발생기

단광자 발생기에는 단분자(single molecule), 양자점(quantum dots), 다이아몬드 색깔중심(diamond color centers) 등이 있는데, 이들의 크기는 두 원자 결합에서부터 수 나노미터 수준이다. 단광자 발생기는 작고 간단한 구조에 기인해 양자적 이분

REFERENCES

- [2] C. H. Bennett and G. Brassard, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing* (Bangalore, India) (New York, IEEE) (1984).
- [3] S. W. Hell, *Science* **316**, 1153 (2007).
- [4] M. Celebrano, P. Kukura, A. Renn and V. Sandoghdar, *Nat. Photon.* **5**, 95 (2011).
- [5] B. Lounis and M. Orrit, *Rep. Prog. Phys.* **68**, 1129 (2008).
- [6] J. Y. Cheung, C. J. Chunnillal, E. R. Woolliams *et al.*, *J. Mod. Opt.* **54**, 373 (2007).

Fig. 4. Single photon emitters. (a) Single molecule (b) Quantum dots (c) Diamond (nitrogen) color centers.

준위계(two level system)로 기술할 수 있다. 또한 한 번에 단 하나의 여기 전자만을 허용하며, 전자가 다시 기저 상태로 돌아오면서 한 개의 광자를 방출하게 된다. 다시 말해 시스템이 한 번 여기되고 다시 기저 상태로 돌아오는 한 순환과정을 통해 하나의 광자를 방출하게 된다. 따라서 여기-방출의 순환 과정을 시간 축에서 조절하게 되면 방출되는 광자의 배열을 조절할 수 있게 되는 것이다.

좋은 단광자 소스로서의 조건으로는 여러 가지를 생각해 볼 수 있으나 가장 우선적으로 고려해야 할 사항은 높은 신뢰도로 단일 광자를 생성할 수 있는 능력이다. 이는 1. 원하는 타이밍에 전자를 여기시키고, 2. 빠른 자가 방출 과정을 통하여 광자를 방출하며, 3. 방출된 광자를 수집하여 사용하고자 하는 곳으로 보낼 수 있는 능력을 말한다. 또한 4. 장시간 동안 안정적으로 작동해야 하며, 5. 원하는 편광, 파장, 방출과장대역(emission line-width)을 가져야 한다. 단광자 발생기마다 가지는 광특성이 모두 다르고, 단광자의 응용분야에 따라 필요로 하는 요소가 다르기 때문에 어떤 단광자 발생기가 가장 우수하다고 단정지어 말하기는 어려운 부분이 있다. 여기서는 단분자가 가지는 광특성을 타 단광자 발생기들과 비교하여 장·단점을 알아보도록 한다.

1. 여기(Excitation)

단분자를 여기시키는 방법으로 대부분 레이저(cw-mode, pulsed)를 사용한다. 단분자의 크기는 수 나노미터 정도로 매우 작은 흡수단면적(absorption cross-section)을 가진다. 높은 개구수(NA: numerical aperture)를 가지는 렌즈로 레이저를 단분자에 집속시키는 경우에도 백만 개 정도의 광자들 중 한 개만이 흡수되게 되는데, 여기 확률을 1에 가까이 가져가기 위해서는 높은 세기의 레이저가 필요하게 된다. 현재 높은 파워를 가지는 레이저가 개발되어 있지만 비용면에서 작은 파워로 높은 효율을 얻을 수 있는 방법이 필요하다. 높은 파워의 레이저는 시료를 손상시킬 수 있다는 또 다른 문제점이 존재한다. 단분자를 비롯한 양자점과 50 nm 지름 이하 크기의 다이아몬드

색깔중심에서도 비슷한 문제점이 보고된 바 있다.^[5] 이를 해결할 수 있는 방법으로 광학안테나(optical antennas)를 생각해 볼 수 있다. 안테나는 '신호를 효과적으로 외부의 신호를 받아들이거나 또는 신호를 외부로 방출하는 장치'며, 광학안테나는 그 작동 영역이 광학주파수대인 안테나를 말한다. 이 경우 레이저는 광학안테나에 의해 더 좁은 영역에 집속될 수 있으며, 단분자를 집속된 영역에 위치시킴으로써 여기확률을 크게 향상시킬 수 있다. 광학안테나를 사용하여 100~1000배까지 흡수확률을 증가시킬 수 있음이 보고된 바 있다.^[7,8]

2. 광자 방출_자가 방출률(Spontaneous emission rate)

여기상태의 전자가 바닥상태로 전이하면서 광자를 방출하는 과정에는 유도 방출(Stimulated emission)과 자가 방출(Spontaneous emission)의 두 가지가 있다. 유도 방출을 이용하는 대표적 사례로 레이저를 들 수 있으며, 이 경우 레이저 공진기 내부에 존재하는 빛(광자)이 들뜬 상태에 있는 전자에 섭동(perturbation)을 일으키면서 자신과 동일한 상태(동일한 방향, 편광, 위상, 파장)의 빛을 방출하게 함으로써 한 특정 상태의 빛(광자)을 증폭하게 된다. 하지만 단광자 발생기에서의 형광 방출의 경우 이미 존재하고 있는 빛(광자)이 존재하지 않으므로 유도 방출과정이 발생할 수 없다. 빛(광자)이 전혀 존재하지 않는 경우에도 공간상에는 바닥 에너지가 존재하는데 이를 진공 에너지(Vacuum energy)라 하며, 이는 조화진동자(Harmonic Oscillator) 모델에서의 기저 에너지에 해당한다. 이 진공 에너지(혹은 필드: vacuum field)가 일으키는 섭동에 의하여 전자가 여기되고 빛이 방출되는 과정을 자가 방출이라 한다. 이를 진공 에너지에 의한 유도 방출과정이라 부르기도 한다.

단분자에서는 평균적으로 수 ns~수십 ns 정도의 긴 자가 방출시간을 가지는데, 이는 정확한 광자 발생 타이밍을 얻거나 밝은 단광자 소스를 개발하는 데 있어 걸림돌로 작용하고 있다. 여기시점부터 광자가 방출될 때까지의 시간에 대한 확률분포는 감소하는 단일 지수함수 형태로 주어진다(Fig. 5). 그림 5에서처럼 자가방출시간이 길다면 여기시키는 레이저 펄스를 균일하게 입사시켜도 방출되는 단광자의 배열은 불규칙해지게 된다. 또한 이 경우 얻을 수 있는 최대 광자수 또한 제한된다. 예를 들어 평균자가방출시간이 10 ns이라면 얻을 수 있는 최대 광자수는 $(10 \text{ ns})^{-1} = 10^8/\text{s}$ 로 주어지게 된다. 단광자 발생

REFERENCES

- [7] H. Eghlidi, K. G. Lee, X. W. Chen, S. Götzinger and V. Sandoghdar, Nano Lett. **9**, 4007 (2009).
- [8] A. Kinkhabwala, Z. Yu, Sh. Fan, Y. Avlasevich, K. Mullen and W. E. Moerner, Nat. Photon. **3**, 654 (2009).

Fig. 5. Photon emission from single molecule. More regular photon array with shorter spontaneous emission lifetime.

기에서의 자가방출률을 높이는 것은 신뢰도를 높이고 동시에 밝기 문제를 해결한다는 점에서 단광자 소스 개발에 있어 가장 큰 이슈 중 하나이다.

만일 단광자 발생기 위치에서의 진공 에너지 크기를 조절할 수 있으면 섭동의 세기를 조절하여 자가 방출률을 조절할 수 있게 되는데, 이런 현상을 이용하는 대표적인 사례로 마이크로 공동 구조(Micro-cavities)를 들 수 있다. 공동 구조의 부피를 작게 가져갈수록 진공에너지를 크게 만들어 자가 방출률을 높일 수 있으며, 부피가 V 인 경우 자가 방출률은 $\sqrt{V}$ 에 반비례하게 된다. 또한 공동 구조 내부에서 광자가 평균적으로 살아남는 시간을 늘림으로써 자가 방출률을 증가시킬 수 있다. 예를 들어 두 개의 (오목한) 거울로 이루어진 공동 구조의 경우 거울의 반사율을 증가시키면 내부에 존재하는 빛(광자)이 소실되기 전까지 더 오랜 시간 동안 존재할 수 있는데, 소실까지의 평균 시간에 비례하여 자가 방출률이 증가하게 된다. 이는 방출되는 광자가 취할 수 있는 상태밀도함수(Density of States)가 증가하기 때문이며 다음과 같은 비유로 설명할 수 있다. 전자의 전이를 통하여 빛을 생성하는 과정을 물통에서 물을 빼내는 과정에 비유했을 때, 배출구의 크기를 증가시키면 배출 시간을 줄일 수 있게 된다. 빛이 공동 내부를 더 많이 왕복할 수 있다는 것은 방출되는 광자가 택할 수 있는 채널 수가 그 만큼 증가함을 의미하게 된다. 마이크로 공동 구조는 자가방출률을 높이는 아주 효과적인 방법이지만, 단광자 소스 개발의 측면에서는 한 가지 큰 단점을 가진다. 높은 자가방출률을 기대하기 위해서는 좋은 공동구조를 가져야 하는데, 이는 다시 말해 방출된 광자가 외부로 방출되기 전까지 공동 내부에 오래 머무르게 된다는 것이다. 공동 내부의 손실률은 보통 매우 작지만 0이 아니기 때문에 필연적으로 공동 내부에서 광자 손실이 발생하게 되며 최종적으로 외부에서 광자를 획득하는데 있어 손실을 증가시키게 된다.^[9]

자가방출률을 높이는 또 다른 방법으로서 앞서 기술한 광학 안테나를 이용할 수 있다. 광학안테나는 여기시키는 레이저를

Fig. 6. Enhancing spontaneous emission rate using optical antennas. (a) A dimer antenna composed of two spherical gold nano-particles. (b) Shortened spontaneous emission lifetime of a terrylene single molecule placed at the center of the antenna.

효과적으로 단광자 발생기에 전달할 수 있으며, 동시에 단광자 발생기에서 발생하는 광자를 효과적으로 외부로 방출시킬 수 있다. 이는 공동구조와 마찬가지로 방출되는 광자의 광밀도함수를 증가시키기 때문인데, 방출 광자의 파장이 안테나의 공명 파장과 일치하는 경우 안테나가 방출되는 광자가 취할 수 있는 모드 수를 증가시키게 되는 것이다. 광학안테나가 효과적으로 작동하기 위해서는 단광자 발생기와 안테나 사이의 거리가 수 나노미터 정도로 유지되어야 하며, 안테나의 진동 모드 방향과 단광자 발생기의 쌍극자 진동 방향을 정확히 일치시켜야 하는 실험적인 어려움이 존재한다. 단분자는 단분자를 포함하는 매질(그림 6에서는 para-terphenyl crystal)에 따라 그 정렬 방향을 쉽게 조절할 수 있어 타 단광자 발생기에 비해 광학안테나에 적용하기 용이한 면이 있다. 광학안테나를 이용하여 자가방출률을 100배 이상 증가시키는 것이 가능하며,^[10] 더 높은 효율을 얻기 위한 노력이 경주 중이다. 초기 광자 방출효율이 낮은 단광자 발생기의 경우 1000배 이상 광자방출효율을 증가시킨 결과도 보고된 바 있다.^[8]

3. 광자 수집 효율(Collection efficiency)

단광자 발생기를 효율적으로 여기시키고 광자를 방출시켰더라도 단광자 소스로서의 충분한 신뢰도를 보장하기 위해서는 높은 수집 효율이라는 추가 조건이 필요하다. 원하는 타이밍에 단광자를 발생시키더라도 방출된 광자를 사용하지 못하고 잃어버린다면 아무런 소용이 없는 것이다. 자가방출을 일으키는 주된 섭동은 단광자 발생기의 전기쌍극자가 진공 에너지와 작용

REFERENCES

- [9] D. Press, S. Götzinger, S. Reitzenstein *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 117402 (2007).
- [10] K-G. Lee, H. Eghlidi, X-W. Chen *et al.*, Opt. Express **20**, 23331 (2012).

Fig. 7. Near-unity collection efficiency with dielectric optical antennas. (a) Dipolar radiation pattern of single emitters in homogeneous media. (b) Almost every emitted photon goes into the collection lens. (c) Modified emission pattern.

하여 발생하는데, 결과적으로 전기쌍극자 복사 형태로 광자를 방출하게 된다 (Fig. 7(a)). 균일한 매질 속에서의 경우 어떠한 렌즈를 이용하더라도 광자 수집효율이 50%를 넘지 못하게 된다. 따라서 수집 효율을 높이기 위해서는 단광자 발생기에서의 광자 방출패턴을 변형시켜 수집렌즈의 허용각도 안으로 모든 광자가 들어갈 수 있도록 해야 한다. 이 문제 해결에 대한 방법으로 마이크로 공동구조(40%),^[11] 나노막대구조(72%)^[12] 등 다양한 시도들이 있어왔으며, 최근에 유전체 광학안테나를 이용하여 방출된 광자의 99% 이상을 수집할 수 있는 기술이 개발되었다.^[13,14]

4. 안정성(stability)

좋은 광소스는 장시간 동안 안정적으로 작동해야 한다. 그림 8은 단분자(terrylene molecule)에서 방출되는 광자수를 시간 축상에 나타낸 것이다.

그림 8에서 볼 수 있듯이 짧은 시간 간격 동안 빛을 내지 않는 점멸현상(blinking)과 더 이상 빛을 내지 않는 상태로 변형되는 광과표(photo bleaching) 현상이 존재한다. 단광자 발생기들을 기술할 때 주로 이분 준위계를 가정하지만 실제 단광자 발생기가 가지는 에너지 레벨 구조는 그림 8(b)에서 보여 주듯 더 복잡하다.^[15] 단분자, 양자점, 다이아몬드 색깔중심 모두 격자구조나 매질 속에 위치하기 때문에 진동(vibration)과 격자운동(phonon)의 영향을 받게 된다. 빛을 방출하는 on 상태(Fig. 8(b)의 붉은 점선에 있던 전자가 off 상태(meta-stable state)로 전이되면 다시 on 상태로 돌아오기까지 빛을 내지 않는 상태가 된다. 이 점멸과정에 대한 명확한 이해는 아직 이루어지지 않고 있으며, 단광자 발생기를 둘러싸고 있는 주변 구

Fig. 8. (a) Time-trace of number of photons emitted from a terrylene molecule. (b) Energy band diagram of terrylene molecule.

조에 의한 포논의 영향 때문으로 받아들여지고 있다.^[5]

광과표현상은 단광자 발생기의 구조자체가 더 이상 해당 파장영역에서 빛을 방출할 수 없는 구조로 변형되는 것을 말한다. 광과표현상은 공기 중의 산소농도와 밀접한 관계가 있으며, 단광자 발생기가 여기시키는 레이저와 산소에 동시에 노출되었을 때 활발하게 발생한다. 단분자와 양자점의 경우 상온에서 공기 중에 노출된 경우 평균적으로 백만 개 정도의 광자만을 광과표가 일어나기 전까지 방출할 수 있다. 이에 비하여 다이아몬드 색깔중심은 다이아몬드의 단단한 격자 구조 속에 위치해 있기 때문에 공기 중의 산소로부터 보호받을 수 있어 광과표현상이 쉽게 일어나지 않는다. 다이아몬드 내부 깊숙이 위치한 색깔중심에서는 광과표현상이 일어나지 않으며, 나노크리스탈 구조로 만들어진 색깔중심에서는 광과표 현상이 드물지만 발생할 수 있다. 이런 측면에서 다이아몬드 색깔중심을 이용하여 안정적인 단광자 소스를 개발하려는 노력이 활발히 진행되고 있다.^[15] 단분자, 양자점을 특정 매질 속에 넣게 되면 같은 이유에서 광과표현상을 줄일 수 있다. 크리스탈 구조에 삽입된 단분자의 경우 상온·공기 중에서 수 일 이상 안정적으로 작동하기도 한다.

5. 편광(polarization), 파장(wavelength), 선폭(line-width)

단광자의 편광 정보를 이용하는 경우 방출 광자의 편광이 잘 정의될 필요가 있다. 단분자, 양자점의 경우는 흡수와 방출에 관여하는 쌍극자 방향이 잘 정의되어 있으며 방출된 광자의 편광을 임의대로 재단하는 것이 가능하다. 이에 비하여 다

REFERENCES

- [11] S. Strauf, N. Stoltz, M. Rakher *et al.*, Nat. Photon. **1**, 704 (2007).
- [12] J. Claudon, J. Bleuse, N. S. Malik *et al.*, Nat. Photon. **4**, 174 (2010).
- [13] K. G. Lee, X. -W. Chen, H. Eghlidi *et al.*, Nat. Photon. **5**, 166 (2011).
- [14] X. W. Chen, S. Göttinger and V. Sandoghdar, Opt. Lett. **36**, 3545 (2011).
- [15] K. G. Lee *et al.*, in preparation.

이아몬드 질소 색깔중심의 경우는 방출파장이 잘 정의되지 않는다. 주된 편광방향과 수직 방향으로 편광된 광자가 20~30% 섞여있게 된다.^[16] 질소 이외의 다른 원자들이 이루는 색깔중심에서는 방출 편광이 잘 정의되어 있음이 보고되고 있다.^[17]

단분자와 다이아몬드 색깔중심의 경우 방출 파장은 기본적으로 구성 원자의 종류와 결합형태로 결정되어지지만, 전기적인 방법으로 미세한 수준이지만 파장을 조절하는 것이 가능하다.^[18] 이에 비하여 양자점은 그 크기를 조절함으로써 넓은 영역대에서 파장 조절이 가능하다는 장점이 있다.

양자 연산의 경우 구별 불가능(indistinguishable)한 광자들의 간섭현상을 이용하게 되는데, 이 경우 매우 좁은 방출파장 선폭(Fourier limited line-width)을 요구하게 된다. 단분자, 양자점, 다이아몬드 색깔중심 모두 극저온 상태($< 2\text{ K}$)에서 이 조건을 만족할 수 있다.^[5]

이상에서 간략히 살펴보았듯이 어느 단광자 발생기가 단광자 소스로서 가장 적합한지 결정하기는 어렵지만 단분자, 양자점, 다이아몬드 색깔중심 모두 좋은 단광자 소스로서의 충분한 가능성을 가지고 있다.

결 론

본고에서는 단광자 소스의 특성과 응용분야에 대하여 살펴보

았다. 또한 단광자 발생기(단분자, 양자점, 다이아몬드 색깔중심)의 광특성과, 이를 더욱 향상시켜 고품질의 단광자 소스를 개발하기 위한 광기술들에 대하여 논의하였다.

단광자 소스는 레이저에 비해 광학적으로 반(反)하는 성질을 가지고 있다. 광자들의 결맞음성을 희생하는 대신 광자의 수를 정확히 조절할 수 있는 것이다. 이런 특성으로 말미암아 단광자 소스는 과학 전반에서 다양한 응용가능성을 지니고 있다. 이는 효율 높은 단광자 소스가 레이저의 역할을 상당부분을 대체할 수 있다는 의미이며, 앞으로 과학기술분야뿐 아니라 산업 전반에 큰 영향을 가져 올 것이라 예상된다. 단광자 소스가 새로운 광소스로 주목받기 시작한 것은 불과 얼마 전이며, 현재 단광자 소스의 효율을 높이기 위한 노력이 전 세계적으로 진행 중에 있다.

REFERENCES

- [16] I. Aharonovich, S. Castelletto, D. A. Simpson *et al.*, Rep. Prog. Phys. **74**, 076501 (2011).
- [17] E. Neu, M. Agio and C. Becher, Opt. Express **20**, 19956 (2012).
- [18] Y. L. A. Rezus, S. G. Walt, R. Lettow *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 093601 (2012).