나노 재료 형성기술과 응용

천 진 우
(KAIST 화학과)

1. 나노 결정의 일반적 성질

고체 결정질의 경우 화학적 물리적 특성은 그 결정만이 갖는 고유한 성질을 가지고 있다. 예를 들면, 녹는점, 끓는점, 경도, 강도, 광학적 특성 및 자기적 특성은 그 물질만이 갖는 고유한 특성이다. 그래서 결정의 화학적 물리적 성질은 결정질의 형태나 크기에 무관하게 그 결정질의 성분과 결정구조에 의해 결정된다고 할 수 있다. 그러나 이 물질의 크기가 나노 미터 (10^{-9} m) 범주에 들어가면 결정질의 크기는 그것의 성질의 변수로서 작용하게 된다. 지난 20여년간 무기 결정질의 크기 조절에 의한 물질의 성질변화에 대한 연구는 합성 나노 화학을 기초과학 및 응용과학의 매우 중요한 한 분야로서 자리잡게 만들었다[1-4].

나노 결정은 그 크기 변화에 따라 그 물리화학적 성질에서 매우 주목할 만한 변화를 가져온다. 예를 들면, 화합물 반도체인 CdS는 크기 조절에 의해 2.5~4 eV의 밴드갭 조절이 가능하며, 또한 이에 따른 최저 준위 발광 속도는 수십 나노 초부터 수십 피코 초까지 변화되어진다.

일반적으로, 이러한 나노 결정 성질의 변화는 결정 크기 조절에 따른 두 가지 효과에 의해 나타난다. 첫째 표면 원자의 증가로 들 수 있고, 또 다른 하나는 표면 원자에 무관하게 단순한 내부 결정의 크기의 함수로서 나타내어지는 전자 에너지 준위 밀도의 체계적인 변화를 들 수 있다.

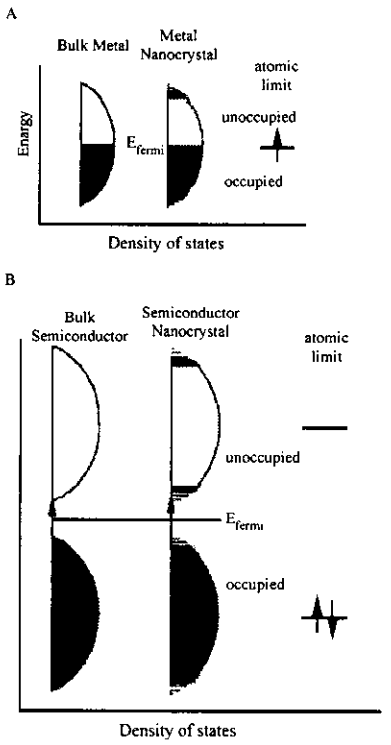

그림 1. 나노 결정의 전자 밀도 분포 (A) 금속, (B) 반도체.

결정의 크기가 작아지면 전체 원자에 대한 표면원자의 비가 크게 증가하며 이러한 결과는 물질의 열역학적 성질에 큰 변화를 일으킨다. 일반적으로 고체 물질의 표면 원자들은 내부 원자들에 비해 자유 에너지에 큰 기여를 하는데 표면원자의 증가는 나노 결정의 열역학적 성질 (예: 녹는점 내림, 상전이) 를 변화시킨다[1]. 예전에는 나노 결정의 표면은 매우 불규칙하게 구형, 타원 형태로 존재한다고 여겨졌으나 최근 연구에 따르면 규칙적이고 일정한 형태의 결정구조를 가지고 있는 표면 원자의 조절의 가능성이 제시되고 있다. 만약 표면 에너지의 조절이 가능하다면 매우 중대한 과학적 의미를 갖는다. 표면 에너지의 조절이 가능하게 되면 벌크 결정에서 나타나지 않는 새로운 결합 형태를 갖는 나노 결정의 제조가 가능하게 되고 기존에 존재하지 않던 새로운 형태의 물질 특성의 조작이 가능하게 된다. 이에 새로운 결합 형태의 가능성에 대한 연구로서 처음으로 많은 관심을 끈 것이 나노 결정에서의 녹는점 감소 등, 고체 결정의 상전이에 대한 연구이다.

위에서 언급했듯이 나노 결정은 표면 원자에 의해 나타나는 특성과 표면원자와는 무관하게 그 크기의 함수로서 나타나는 두 가지 성질을 갖고 있다. 즉, 결정의 크기가 작아지면서 표면원자의 증가가 일어날 뿐 아니라 결정의 전자 상태의 변화가 일어나기 시작한다. 이러한 성질은 쉽게 생각되어질 수 있다. 나노 결정은 무한 결정과 분자 (또는 원자)의 중간체이다. 즉, 결정의 크기가 나노 정도의 크기가 되면 무한 결정의 성질을 많이 갖고 있긴 하지만 분자의 성질이 서서히 나타나기 시작한다. 즉, 전자 상태의 구조가 연속적인 무한 결정의 전자 상태에서 분리된 분자의 전자상태로 변해가는 중간적인 형태의 양자화 되어가는 전자 상태를 갖게 되는 것이다 (그림 1). 이러한 성질은 반도체 나노 결정의 밴드갭이 크기의 함수로 나타내어지며, 이로 인해 크기에 따른 밴드갭이 조절되는 성질을 갖게 된다 [1].

2. 나노 결정의 합성 및 구성

지난 20년간 화학, 물리학, 재료공학등에서 반도체 나노 결정의 합성법 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 나노 결정은 Bulk와 분자의 중간체라고 할 수 있다. 따라서 두 가지 방향에서 나노 결정을 합성하는 접근이 가능하다. 즉, top-down approach (Bulk to Nano)와 bottom-up approach (Molecule to Nano)가 그것이다 (그림 2). top-down approach 는 Bulk 물질의 조각내는 방법을 통해 3차원 결정을 더 낮은 차원을 갖는 나노 결정으로 만든다. 이러한 접근법은 주로 리소그래피 (lithography)나 mechanical attrition (ball milling)을 통해 이루어졌다. 이 방법은 나노 결정의 크기를 쉽고 정확하게 조절할 수 있다는 장점과 원하는 위치에 만들 수 있다는 장점을 갖고 있으나 현재 기술로는 50 nm 이하에서 그 한계를 갖고 있으며 기술적인 진보가 가능하다고 해도 30 nm이하의

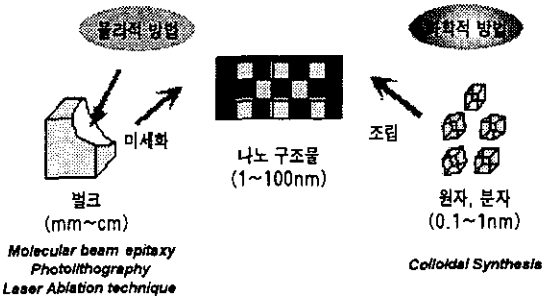

그림 2. 나노 결정의 합성 접근법.

범주의 나노 결정에 대해서는 거의 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점의 해결은 분자선구 물질을 통한 bottom-up approach를 통해 가능해진다. 이러한 bottom-up approach는 STM을 통한 원자의 재배열과 같은 방법도 포함하지만, 주로 화학적인 분자나 원자 선구 물질을 통해 콜로이드 용액상 합성을 통해 이루어진다. 이러한 화학적 용액 합성에서 가장 중요시 되는 것은 나노 결정의 크기 및 형태의 조절이다.

2.1 기체상 합성 방법

초기에는 나노 결정을 주로 기체상 방법을 통해 합성하였다. 즉, 감압조건에서 적당한 선구 물질을 사용하여 evaporation (or sublimation), condensation과정을 통해 결정 핵의 생성과 결정 성장을 통한 방법을 통해 나노 결정의 합성이 주로 이루어졌다. 이러한 기체상 합성은 여러 가지 다른 방법을 통해 이루어졌는데 aerosol-processing techniques, combustion flame, plasma, laser ablation, chemical vapor condensation, spray pyrolysis, electrospray, plasmaspray등을 통해 이루어 졌다.

이러한 기체상 합성은 직접 substrate에 증착하는 방식으로 균일하게 생성이 될 경우 바로 소자로서 응용할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 고온 저압조건하에서 합성되기 때문에 높은 결정성을 갖을 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 기체상 합성은 결정핵의 생성에 있어 homogeneous nucleation이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 또한 이러한 기체상에서 만든 순수한 클러스터는 완전 결정처럼 보이지만 사실 이 나노 결정은 매우 결함이 많은 결정이다. 이것은 순수 반도체의 표면의 원자 는 원자 위치에 부분적인 재구성이 일어날 수 있고 이에 의해 벌크 결정에서는 금지된 에너지 상태가 불규칙적으로 생겨나게 된다. 이러한 표면 에너지 상태는 전자나 hole의 덫 (trap) 으로서 역할 하게 되는데 결국 그 결정의 전기 및 광학적 성질을 저하시키는 요인이 된다. 주로 이러한 문제의 해결은 표면 원자에 큰 밴드갭을 가진 다른 물질로 결합시키는 방법을 통해 이루어졌다. 이러한 방법을 패시베이션 (passivation) 이라고 하는데

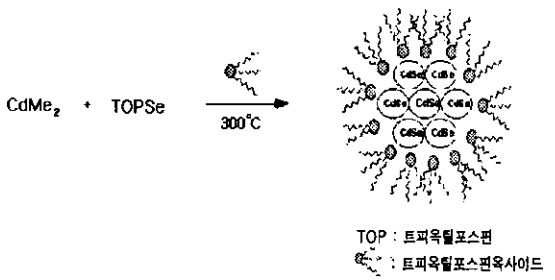

그림 3. 분자 선구물질을 이용한 CdSe 반도체 나노결정의 합성.

주로 표면에 더 큰 밴드갭을 가진 무기 화합물의 에피텍시 성장 (epitaxial growth)을 통하면 결정 구조의 재구성 및 표면 스트레인이 줄어들게 되어 표면 결함 (defect) 에 대한 영향을 줄일 수 있다. 이에 대표적인 예로서 GaAs 기판위에 생성시킨 Al1-xGaxAs 나노 결정을 Si, SiO_2 로 패시베이션 시키면 이러한 효과가 아주 잘 나타난다.

2.2 용액상 합성 방법 (Colloidal synthesis)

일반적으로 용액상 합성은 안정화 리간드 (stabilizer)의 micelle을 반도체 나노 결정 성장의 틀로 사용하여 이루어진다. 이러한 용액상 합성은 여러 가지 방법으로 시도되었는데 크게 보면 두가지 방법으로 나눌 수 있다. 물 또는 polyol 용매하 (또는 mixed phase)에서 ionic precursor를 사용하여 결정을 성장시키는 방법 (wet chemical synthesis)과 hot surfactant (stabilizer) 를 용매로, 유기금속 화합물을 선구 물질로 사용하여 rapid injection을 통한 열분해 반응을 이용한 결정핵의 생성 및 결정 성장을 통한 방법이다. (non-hydrolytic synthesis) 이러한 두 가지 방법은 둘 다 장단점을 가지고 있다. 이온 선구 물질을 사용한 wet-chemical synthesis의 경우 선구 물질의 제조가 간단하며 반응조건이 mild하고 또한 합성이 매우 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 방법은 낮은 온도의 반응 조건하에서 진행되므로 non-hydrolytic synthesis에 비해 비교적 반응 시간이 길다는 단점과 더불어 결정핵의 생성에 있어 homogeneous nucleation이 어렵다는 점과 결정 성장의 조절이 어렵기 때문에 나노 결정의 합성에 있어 가장 중요시되는 좁은 크기 분포를 갖는 나노 결정의 생성과 나노 결정의 크기 조절이 어렵다는 단점을 갖고 있다.

이에 비해, non-hydrolytic synthesis는 유기 금속 화합물의 열분해 반응을 통해 이루어지기 때문에 rapid injection과 온도 조절을 통해 결정핵의 성장과 결정성장을 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 따라서 크기 조절이 용이하고 좁은 크기 분포를 가지는 나노 결정의 합성이 가능하다. 그러나 이 방법은 non-toxic하고 effective 한 선구 물질과 hot surfactant가 아직 한정되어 있다는 데에 단점을 갖고 있다.

Nonhydrolytic synthesis는 1993년 TOPO를 이용한 hot injection 방법으로 인해 큰 관심을 이끌었다 [5]. 이 연구에서는 유기금속 카드뮴 화합물 (CdMe2)과 셀레늄 화합물 (TOPSe)를 hot TOPO에 주입시켜 homogeneous하게 nucleation 시키고 그 후에 열에너지에 의해 결정성장을 시켜 반도체 나노 결정을 합성하는 방법을 사용하였다. 합성된 나노 결정은 그 크기에 따른 용해도 차이를 이용하여 분리하는 size selective precipitation 방법을 통해 그 크기분포가 약 5%이하가 되도록 매우 균일하게 합성할 수 있다는 것을 보여주었다 (그림 3). 이러한 size selective precipitation 방법은 균일한 크기의 나노 결정을 분리할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 균일한 크기의 나노 결정을 합성할 수 있음으로 해서 크기에 따른 일정한 물리적 화학적 성질을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 나노 결정의 정렬을 통한 초격자 구조도 가능하게 하여 소자로서의 응용을 가능하게 할뿐만 아니라 정렬된 구조에서 나타나는 새로운 성질에 대한 연구도 가능하게 한다. 또한 최근 결과에 따르면 size selective precipitation을 하지 않아도 분자 선구 물질을 이용하여 고온 조건에서의 hot injection을 통해 쉽게 입자의 크기를 결정할 수 있음이 밝혀졌다 [6].

이밖에 고분자에 embedding 하는 방법, 수용액 상에서 sonocation을 통한 합성, autoclave에서의 elemental 반응 등 여러가지 방법들을 통해 나노 결정의 합성이 이루어지고 있으나 아직 쉽게 크기와 형태를 조절할 수 있는 일반적인 합성법이 확립되지 않고 있다.

2.3 비등방성 나노결정 (Anisotropic nanocrystals)

나노 결정은 그 크기뿐만 아니라 형태에 의해서도 전자구조의 변화가 생긴다. 즉, 나노 결정이 3 차원 벌크 결정에서 2차원 quantum layer, 1차원 quantum wire, 0차원 quantum dot의 형태로 변화되면서 전자 상태가 더 discrete하게 변해간다. (그림 4) 형태에 의해 나노 결정의 전자 구조가 바뀜으로 인해 새로운 성질들이 나타나기 시작하는데, 예를 들면 반도체 nanorod에서 나타나는 편광현상, 액정현상, 비선형 현상 등을 비롯하여 자성 나노 막대의 경우에는 비등방성 구조에서 비롯된 증가된 자성성질 (자성전이온도의 증가) 등 다른 형태에서는 볼 수 없는 새로운 현상들이 나타난다.

최근에 들어 비등방성 나노 결정 (anisotropic nanocrystals) 의 용액상 합성에 대해서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 비등방성 나노 결정의 합성은 처음에는 주로 Au, Ag 같은 귀금속 (novel metal) 에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 주로 수용액에서 CTAB, DDAB 등 ammonium bromide 같은 염 종류의 rod shape의 micellization을 하는 surfactant를 통한 금속 이온의 환원을 통해 금속 nanorod를 형성시키는 것이 일반적인 방법이었다. 최근에 수용액이 아닌 nonhydrolytic 용매하에서 열분해 시킴으로서 육방 밀집 결정

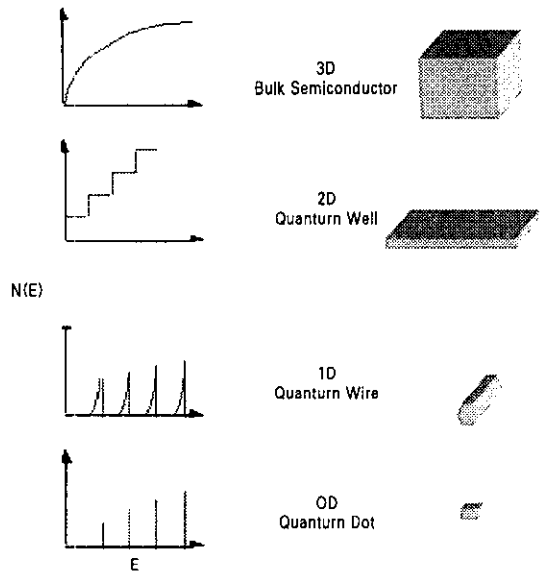

그림 4. 차원에 따른 나노 결정의 전자 밀도 함수.

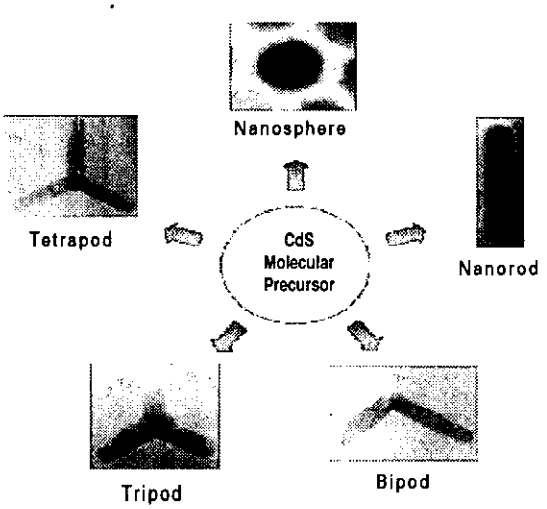

그림 5. 분자 선구물질을 이용한 여러 가지 형태의 나노 구조물 합성.

성장의 방향성에 의해 CdSe nanorod를 형성될 수 있음과 이로 인해 나타나는 편광 현상에 대해 보고되었다 [7]. 또한 이러한 반도체 나노 막대를 기본으로한 여러 가지 형태의 CdS 나노 구조물의 합성이 가능함도 밝혀졌다 (그림 5) [8]. 자성 물질의 경우 열분해 과정을 통해 구형 형태의 Fe nanosphere가 형성된 후 안정화 리간드의 치환을 통해 구형 형태의 nanosphere에서 한쪽 방향으로 결정 성장을 시키는 과정을 통해 1차원 적인 Fe nanorod를 형성시킬 수 있음과 그 형태로 인해 증가되는 자성에 대해 보고되었다 [9].

현재 비등방성 나노 결정의 합성에 관한 연구는 많이 진행되고 있으나 이 부분 역시 일반적인 비등방성 나노 결정의 성장 방법과 합성에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

3. 나노 결정의 정렬 및 응용

나노 결정이 하나의 인공원자 (artificial atom)로 인식되어 다차원적 배열이 이루어지면 여러 가지 다양한 성질이 나타난다. 경도나 강도는 그레인의 크기가 커질수록 커지는 것이 일반적인 현상이나 나노 결정에서는 이와는 다른 새로운 현상들 (크기에 따라 영향을 받지 않는다거나 또는 크기가 커질수록 경도, 강도가 감소하는 현상) 이 나타난다. 또한 특정 다결정질 나노 물질의 경우 Superplastic 현상을 나타내기도 한다. 이러한 정돈된 형태에서 나타나는 기계적 성질뿐만 아니라 다른 물리적 · 광학적 성질을 이용한 소자 응용을 위해서는 양자점의 정렬이 필요하다.

3.1 자기조립 합성 방법(Self-assembled nanocrystals)

기존에 알려진 양자점 정렬 방법은 전자 빔 리소그래피 (lithography) 를 이용하여 나노 패턴을 형성시킨 후 δ-건식-식각 (dry-etch) 방법으로 정렬된 양자점을 얻을 수 있었다. (그림 6A) 그러나 이러한 방법은 표면 원자의 변화에 따른 여러 가지 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점의 해결 방법은 양자점의 화학적 합성이 가능해 지면서 자기 조립 원리를 이용한 양자점 정렬이 나노 구조물의 건축에 새로운 수단으로 모색되었다.

자기 조립을 이용한 양자점의 나노 구조물의 건축 방법을 매우 확장 시켜주었다.

자기 조립 양자점 정렬은 기존에 사용된 화학적 연결자 (chemical linker) 와 나노 물질 사이의 기존의 고전적인 정전기적 인력을 이용한 것이 아니라 주로 좀더 복잡하지만 약한 결합 (화학적 공유결합, 배위결합, 입체 구조를 통한 결합, 정전기적 인력을 통한 결합, 친수성 극성 인력, 소수성 반데르 발스 결합, 수소 결합 등)을 통하여 이루어진다. 즉, 이러한 자기 조

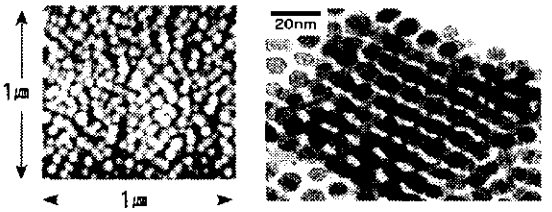

그림 6. 자기조립 원리를 이용한 나노 결정의 자기 정렬 (A) 건식 식각법 (B) 반데르발스 결합

립 방법은 외부의 물리적인 힘에 의한 것이 아닌 자연적인 화학 결합을 이용한 것으로 양자점의 크기와 모양이 일정할 때 규칙적인 배열을 이루며 정렬된 나노 구조를 형성한다 (그림 6B).

3.2 틀을 이용한 정렬

지난 십년간 다공성 무기 물질과 나노튜브의 합성은 매우 경이적인 진보를 이루어 왔다. 이러한 다공성 무기 물질과 나노튜브는 촉매 활성에 대한 놀라운 진보뿐만 아니라 화학적 방법을 통한 나노 구조물 합성의 틀로서 사용될 수 있다는 가능성이 제시되었다. 또한 다공성 물질은 그 동공의 크기와 구조의 조절이 가능하기 때문에 각기 다른 크기의 양자점의 정렬이 가능하다. 예를 들어 분자체 ZSM-5는 동공의 크기가 약 0.6 nm인 반면에 SBA-15은 그 크기가 수십 나노 미터에 이르며, MCM-41, MCM-48, VPI-5 등은 각각 다른 크기의 동공을 가지고 있다. 이러한 각기 다른 동공을 가진 다공성 물질을 반도체 나노 결정의 틀로 사용하면 여러 가지 크기의 양자점 정렬이 가능하다. 또한 실린더 구조를 가진 MCM-41, 큐빅 구조를 가진 MCM-48, SBA-1등 다공성 물질은 서로 다른 구조를 가지고 있기 때문에 각기 다른 형태의 주형으로 사용되어 1차원 배열을 비롯한 2차원, 3차원의 다차원 양자점 정렬이 가능하다 [10] (그림 7).

3.3 단일 전하 전자공학 (Single-charge electronics)

단일 전자 전하 효과에 대한 연구는 구형 형태의 금속을 통해 1950년부터 연구가 시작되었음에도 불구하고 나노 스케일 터널 접합 (Nono scale tunnel jucntion) 에서의 단일 전하 전이에 대한 연구는 10년전부터 본격적으로 Likharev등에 의해 진행되었다. 나노 결정에서 나타나는 Coulombic blockade 효과를 이용하여 단일 전하를 조절할 수 있으리라는 생각은 단일 전자 소자 (single electrondevice: SED)에 대한 관심을 매우 증가시켰다.

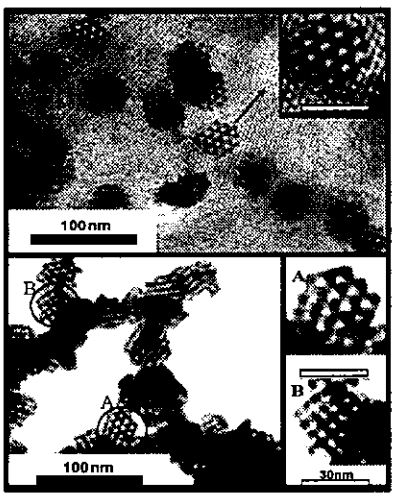

그림 7. MCM-48을 이용한 Pd 3차원 나노 구조물
(A) 매트릭스 제거전 (B) 제거 후.

초기 연구는 주로 리소그래피 (lithography) 방법을 통한 반도체 양자점의 형성을 통해 이루어졌 다. 1992년 Hitachi Europe에서는 δ-doped GaAs 구조를 통해 2K에 side-gate 전압에 따라서 Coulomb gap이 진동하는 것을 관측하였고, IBM 에서는 50 nm Si 양자점을 사용하여 90 K에서 작동하는 flash memory SED를 개발하였다. 이어 lattice mismatch를 통한 헤테로 에픽텍셜 성장으로 만들어진 self-organized quantum dots (SOQDs) 를 이용하여 일본의 동경 대학에서는 AlGaAs/GaAs 박막에 InAs SOQDs을 도입한 헤테로 junction field effect transistor (HFETs)를 제조하고 이를 이용하여 flash-memory SED를 형성하였다. 그러나 이러한 물리적인 방법을 이용한 트랜지스터는 그 크기에 있어 한계를 갖고 있다.

이에 화학 분자 또는 화학적으로 합성된 양자점을 사용한 분자 스위치 및 단일전자 트랜지스터에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 예를 들어 두개의 고리형태 분자를 이용함으로서 전기신호에 따라 열기와 닫기가 가능한 분자스위치를 형성시킬 수 있다[11]. 이 분자스위치에서 한개의 고리분자는 (+) 전하를 띠고, 다른 고리분자의 일부분과 맞물려 있는 안정적인 상태를 이루고 있다. 그런데 두번째 고리 분자의 일부분에 전자를 빼면, 그 부분이 (+) 전하를 띠게 된다. 그러면 원래부터 (+) 전하를 띠는 첫번째 고리분자와의 전기적인 반발력 때문에 고리가 회전하게 된다. 이때 다시 전자를 주입시켜주면, 다시 원상태로 돌아온다 (그림 8). 이처럼 외부에서 전자를 넣고 빼줌으로써 고리 모양이 바뀌는 것을 이용해 스위치의 열고 닫는 기능을 할 수 있다는 것이다. 또한 지름이 0.7nm인 60개의 탄소로 이뤄진 축구공 형태의 C60 화합물인 플러렌을 이용해서 트랜지스터를 개발하는 것이 가능하다는 것이 최근의 연구를 통해 밝혀졌다 [12]. 전극간의 거리가 약 1nm로 현재 한개의 전자로 구동되는 세계에서 가장 작은 나노 트랜지스터다. 구동 방식은 (+), (-) 전극 사이에 플러렌을 고정시켜 놓는다. 그리고 게이트에 특정 전압 이상을 가하면 고정돼 있던 플러렌이 전극 사이에서 진동하게 된다. 이때 플러렌이 (-)전극에 가까이 다가가 어느 순간에 (-)전극의전자가 플러렌으로 이동한다. 양자 터널링 효과가 일어난 것이다. 또한 플러렌이 (+)전극에 가까이 가면, 전자는 다시 (+) 전극으로 이동한다 (그림 9) . 아직 150 K의 낮은 온도에서만 구동되고 있다는 단점이 있지만 화학분자를 이용한 단일 전자 트랜지스터의 가능성을 보여주고 있다.

3.4 양자점 레이저

지금까지 반도체 레이저는 많은 제품의 주요 구성 요소로 사용되어 왔다. 반도체 레이저는 콤팩트 디스크나 레이저 프린터

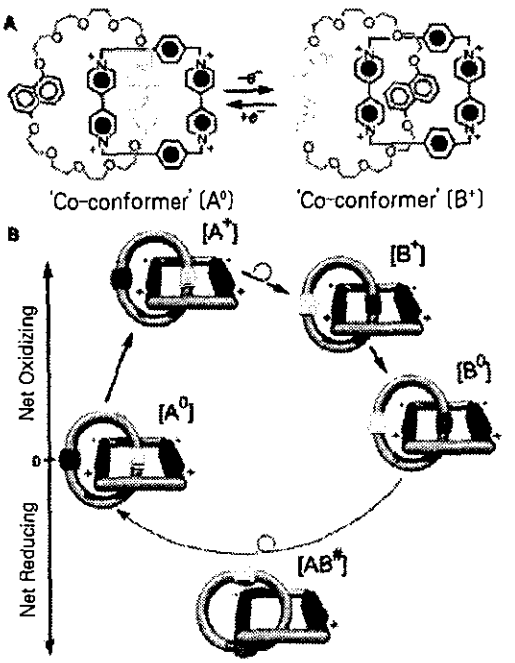

그림 8. cartenane기를 이용한 분자 스위치.

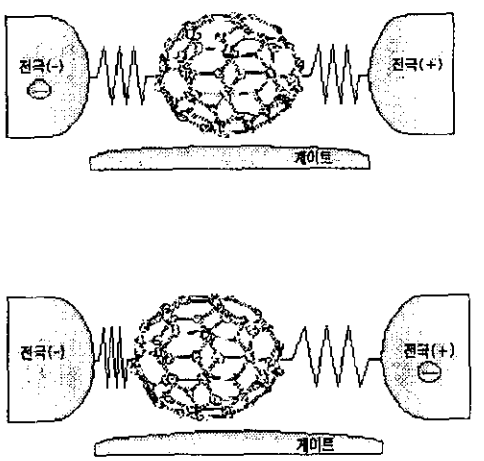

그림 9. 풀러렌(C60)를 이용한 단일 전자 트랜지스터.

같은 소형 기기에서의 주요 부품으로 사용될 뿐 아니라 광통신 분야에 있어서까지 중요한 역할을 해왔다. 레이저 작동의 근본 원리는 전자와 정공의 비평형 밀도의 형성과 이에 따르는 자극 방사 방출을 일으키게 하는 광장 (light field) 에 의한 전자와 정공의 커플링(coupling)에 의해 이루어진다. 1970년대에 이루어진 Henry에 계산결과에 따르면, 이러한 반도체 레이저의 활성막으로서 전달자가 제한되어 있고 전자 밀도가 구분된 양자 우물을 사용하면 벌크 활성막을 가진 레이저에 비해 낮은 구동 전류에서 작동하는 더 효과적인 레이저를 만들 것이라고 제안하였다. 또한, 두께 등의 크기에 의존하는 구분된 전이 에너지 준위를 가진 양자 우물의 사용은 그 두께가 수십 나노 미터보다 작아졌을 때, 물질의 파장을 조절할 수 있으리라는 가능성을 제시하였다. 이러한 생각에서 1975년에 처음으로 만들어진 양자 우물 레이저는 일반적인 레이저보다 효율이 낮았으나, 1981년 분자빔 에픽터시 방법의 사용과 헤테로 구조 레이저 디자인의 최적화를 통해 Tsang에 의해 만들어진 양자 우물 레이저는 효율적인 레이저를 가능하게 했다.

이러한 생각에서 비롯하여 많은 연구자들은 양자점 활성막을 사용할 경우 더 큰 효과를 얻을 수 있으리라고 생각하게 되었다. 1982년 Arakawa와 Sakaki는 양자점 레이저가 기존의 반도체 레이저보다 온도 변화에 대해 안정적으로 수행할 수 있고, 이에 높은 온도에서도 붕괴되지 않을 것이라고 예견하였다. 전자-정공의 커플링에 의한 자극 방출은 GaAs 영역에서 일어나고 전달자와 광 모드의 제한은 전달자와 방출사이의 인력을 부여한다. 또한 지난호에서 언급한 차원의 변화에 따른 전자 상태 밀도의 변화에서 볼 수 있듯이 밀도 역전 (population inversion) 은 차원의 감소에 따라 더 효과적으로 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 양자점 레이저의 경우 그 양자점의 크기가 매우 일정해야 하는데 이것은 전자 상태 밀도는 크기 분포가 커짐에 따라 벌크 상태의 전자 상태 밀도처럼 연속적으로 변하기 때문이다.

따라서, 양자점의 결정화가 잘되어 있고 크기가 일정한 양자점 레이저를 개발하는데 많은 연구가 수행되어졌다. 초기 양자점 레이저의 형성은 전자 빔 리소그래피를 통해 양자점을 형성시킨 후 기저 물질에 양자점을 건식-식각 전이를 시키는 방법을 사용하였다. 이 양자점 레이저는 양자점의 정렬의 경우 단위 부피에 따른 표면원자의 증가에 따라 표면에서 빠른 엑시톤 (exciton)의 재조합이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 이에 양자점을 유기 또는 무기 물질에 의해 패시베이션을 한 후 자기 조합을 통한 정렬을 사용한 양자점 레이저에 대한 연구가 진행되었다.

3.5 나노 입자를 이용한 테라급 기억매체

자성 나노 입자의 경우 크기가 작아지면서 어떤 크기(일반적으로 10-100 nm)에 도달했을 때 자기적 성질이 최대가 되는 현상을 나타낸다. 이러한 자성 나노 입자를 이용하면 자기적 성질이 극대화되면서 동시에 크기가 매우 작고 균일한 크기의 구형태 자성 금속입자를 합성하여 이들의 규칙적인 배열을 통해 이 입자 하나 하나를 각각 한개의 비트로 사용할 수 있다 [13-14]. 이런 자성 입자는 크기가 수 nm로 주로 코발트나 코발트와 백금의 합금형태로 이루어진다. 자성 나노 입자를 규칙적으로 배열해 하드디스크와 같은 저장매체에 비트로 사용할 수 있

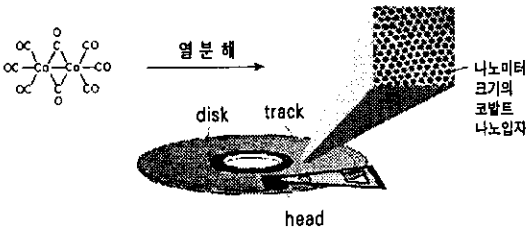

그림 10. 자성나노 입자를 이용한 하드디스크.

계 되면 현재의 저장기록 매체인 자성 박막의 한계를 넘어서 1 백Gbit/inch^2 이상, 나아가서는 테라(10^3 Gbit)급 정보기록매체에 획기적인 돌파구를 제공해줄 수 있다 (그림 10).

3.6 나노 촉매

반도체나 자성 나노입자는 크기에 따라 새로운 전기적, 광학적, 자기적 성질을 나타낼 뿐만 아니라 큰 덩어리에서 작은 덩어리로 쪼갬에 따라 물질의 전체 표면적은 급격히 커지게 된다. 이러한 성질은 나노물질을 새로운 용도의 촉매로서의 활용성을 보여주고 있다.

만약 물질의 표면에서만 촉매반응이 일어나는 경우라면, 물질의 표면적의 증가는 촉매활성을 높일 수 있다. 이런 예로는 심각한 환경 오염물질인 유기 할로겐을 제거하는데 나노크기의 촉매가 이용되는 것. 살충제 등으로 사용되는 유기 할로겐 화합물이나 쓰레기 소각과정에서 발생하는 다이옥신 등은 독성이 강하고 자연분해가 어려워 심각한 환경오염원이 되고 있다. 따라서 이런 환경 오염원을 산화시켜 무해한 물질인 이산화탄소와 염화수소 기체로 분해시키기 위해 많은 노력이 이뤄졌다. 그 결과 MoS_2나 TiO_2 나노물질을 이용한 광촉매 분해반응이 개발됐다. 그러나 촉매반응은 일반적으로 표면에서만 일어나기 때문에 많은 양의 오염물질을 분해시키기 위해서는 다량의 촉매가 필요하다. 이때 새로운 형태의 나노물질을 사용하면 이런 문제를 해결할 수 있다. 즉 크기가 작은 나노물질을 사용하면 표면적이 더 커지기 때문에 양자크기 효과에 의한 촉매의 전기적 상태가 바뀌어 촉매활성이 더욱 배가된다. 가령 입자 크기를 16nm에서 8nm로 줄일 경우에 활성이 7배 이상 증가하게 된다. 이런 나노촉매는 현대사회의 큰 문제 중 하나인 환경문제를 해결할 수 있는 대안으로 부각되고 있다.

참 고 문 헌

[1] Alivisatos, A. P. Science 1996, 271, 933.1.

[2] Heath, J. R. Science 1995, 270, 1315.

[3] Weller, H. Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 1993, 32, 41.

[4] Vossmeyer, T.; Katsikas, L.; Giersig, M.; Popovic, I. G., Weller, H. J. Phys. Chem. 1994, 98, 7665.

[5] Murray C. B.; Norris, D. J.; Bawendi, M. G. J. Am. Chem. Soc. 1993, 115, 8206.

[6] Jun, Y.; Koo, J. E; Cheon, J. Chem. Commun. 2000, 1243.

[7] Peng, X.; Manna, L.; Yang, W.; Wiockham, J.; Scher. E.; Kadavanich, A.; Alivisatos, A. P. Nature 2000, 404, 59.

[8] Jun, Y.; Lee, S.-M.; Kang, N.-J.; Cheon, J. J. Am. Chem. Soc. 2001, 123, 5150.

[9] Park, S. J.; Kim, S.; Lee, S.; Khim, Z. G.; Char, K.; Hyeon, T. J. Am. Chem. Soc. 2000, 122, 8581.

[10] Kang, H. K. Jun, Y. W.; Park, J, -I.; Lee, K. -B.; Cheon, J. Chem. Mater. In press.

[11] Collier, C. P.; Mattersteig, G.; Wong, E. W.; Luo, Y.; Beverly, K.; Sampaio, J.; Raymo, F. M.; Stoddart, J. F.; Heath, J. R. Science 2000, 289, 1172.

[12] Park, H.; Park, J.; Lim, A. K. L.; Anderson, E. H.; Alivisatos, A. P.; McEuen, P. L. Nature 2000, 407, 57.

[13] Sun, S. H.; Murray, C. B.; Weller, D.; Folks, L.; Moser, A. Science 2000, 287, 1989.

[14] Park, J.; Cheon, J. J. Am. Chem. Soc. 2001, 123, 5743.

저 자 약 력

성명 : 천 진 우

❖학력

1993년 8월 University of Illinois, Urbana-Champaign 이학박사 화학

❖경력

1993년 5월 : AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, NJ. 방문 연구원

1993년 9월-1995년 5월: Lawrence Berkeley National Laboratory 재료과 및 Univ. of California, Berkeley 화학과 연구원

1995년 7월-1998년 7월 : UCLA 화학과 연구원

1998년 8월-현재 : 한국과학기술원 (KAIST) 화학과 조교수

1998년 12월-1999년 2월 : UCLA, 미국 방문교수

1999년 6월 : Ruhr University-Bochum, 독일 방문교수