

## 양자점 형성 기술

윤 태 식, 김 기 범  
서울대학교 재료공학부

### I. 서 론

양자점 형성 공정은 양자점을 이용한 전자소자 및 광소자의 응용 가능성이 각광을 받아오며 이러한 소자의 형성을 위한 핵심 공정으로서 제기 되어 온 연구 과제이다. 양자점을 이용한 전자 소자 및 광소자의 기본적 작동 원리는 입자의 물리적인 크기가 나노미터 단위의 크기가 되면, 그 입자의 제반 물리적 성질이 입자의 크기에 큰 영향을 받는다는 양자 역학의 발전과 맥을 같이 한다. 특히 지난 40여년간 끊임없이 발달해 온 기존의 MOS 반도체 전자 소자의 한계를 예상하면서, 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로서 제시되고 있는 단일전자소자(Single Electron Device)의 등장과 더불어, 그 연구에 박차를 가하고 있다.<sup>[1]</sup> 예를 들면, 유럽의 국가는 연합하여 Phantom Project를 출범시켰으며, 미국은 National Nano Project를 국가적 연구 과제로 집중하여 육성하고 있다. 아울러, 국내에서도, 창의적 연구 과제, ERC 등의 연구 과제 등을 통하여 양자점의 형성과 양자점에서 일어나는 제반 물리적 현상에 대한 연구 과제를 수행 중에 있다. 국내외에서 시행되고 있는 이러한 연구 결과에 의하여 양자점에서 일어나는 제반 물리적 현상(예를 들면, coulomb blockade 현상, band-gap aligning 등)에 대한 이해는 어느 정도의 수준에 도달해 있다고 할 수 있다. 다만, 이러한 연구 과제의 수행에 있어서 제작되고 있는 양자점 형성 공정 기술은 주로 AFM(Atomic Force Microscopy), STM(Scanning

Tunneling Microscopy), 그리고 E-beam patterning에 의하여 제조되고 있음으로 인하여 그 크기와 위치에 있어서 제어 기능이 큰 것에 비하여, 대량 생산에의 가능성이 희박하다. 차세대 소자에의 적용을 위해서는, 이러한 기술적 요소를 대량 생산의 단계로 집목시킬 수 있기 위해서는 wafer level에 균일하며 제어된 양자점을 형성할 수 있는 공정의 개발이 필수적인 요건이 된다. 양자점을 소자에 적용하기 위해서는 양자점의 크기가 수 나노미터 정도의 값을 가져야 하며, 양자점의 분포는, 소자의 기능성에 따라 그 요건이 달라질 수 있으나, 높은 공간밀도를 얻는 것이 양자점에 의한 효과를 이용하는 데 유리하다.

이러한 대면적 양자점 형성공정의 개발은 기존의 MOS 소자의 한계를 극복하기 위한 대안으로서의 단일전자소자의 구현과 이를 이용한 차세대 Tera-bit급 메모리 소자 및 THz급 소자의 개발을 가능케 할 것으로 기대된다. 이와 더불어, 정보통신망의 초고속 광통신 모듈 및 초고속 전자소자 등 정보통신 분야에서 요구되는 기반기술을 제공해 줌으로써 정보사회의 기술력을 확보한다는 중요한 의미를 지닌다. 양자점의 형성은 단일전자소자 및 광통신용 소자의 제작뿐만 아니라, 기타 자기소자 및 광소자에의 응용에도 절대적으로 요구되는 기술이 된다.

앞서 설명한 바와 같은 기술적인 측면 이외에, 양자점 형성공정의 개발은 SET(Single Electron Transistor)로 대변되는 단일전자소자의 구현을 통한 post-MOS 시대의 기반 기술의 확보를 통한 반도체 분야의 국가경쟁력의 제고를

의미하므로, 반도체 산업에의 의존도가 큰 국가 경제 발전에 매우 중요한 역할을 담당하게 된다. 이와 더불어, 본 기술의 개발에 이은 관련장치 산업의 육성으로 기존에 절대적으로 수입에 의존하고 있는 반도체 장비 분야의 수입대체에 커다란 기여를 하게 된다. 또한, 본 기술의 발전은 나노 기술로 대변되는 정보통신분야의 발전 및 기타 항공우주, 기계, 계측, 환경, 군사, 의료, 위성통신 등 여러 산업분야의 발전에 요구되는 기반기술이므로 기술적, 산업적으로 다양하게 적용되는 기술분야이다.

## II. 본 문

### 1. 양자점 형성에 관한 기존의 연구동향과 기술수준

양자점 형성 공정은 크게 나누어 아래 열거한 몇가지의 방법으로 접근되어 왔다. 첫째로는 AFM, STM, 그리고 E-beam lithography 등을 이용하여 single 또는 수개의 양자점을 형성하고 그 물리적 성질 및 소자에의 응용 가능성을 연구하는 분야이다. 이러한 방법은 특히 Likarev 등에 의해 SET소자의 적용 가능성이 대두되면서, 그동안 집중적으로 연구되어 온 분야이다. 이러한 연구 결과 수 나노미터 크기의 양자점 형성 및 그 물리적 성질에 대한 고찰은 어느 정도의 단계에 와 있으며, 이 분야의 양자점 형성 공정에 대해서는 이미 국내외적으로 상당한 수준에 있고, 다만 그 물리적 현상에 대한 연구를 지속적으로 수행하는 단계에 있다고 할 수 있다.

두 번째로는 patterning and etching공정에 의하여 제어된 양자점을 형성하는 연구 분야이다. 이 방법은 Princeton 대학에 있는 Steven Chou 교수 등을 중심으로 활발한 연구를 수행 중에 있다. Patterning and etching 공정 역시 두 가지의 단계로 구분할 수 있는 데, 그 중의 하나는 e-beam의 규칙적 patterning을 이용한 방법과 이러한 방법의 throughput을 개선하기 위한 mold and printing 방법이 있다. 이 공정

의 문제점은 전자의 경우, throughput이 낮고 후자의 경우, 아직은 manufacturability에 문제가 있는 공정이라는 점이며 두 가지 방법 모두 아직은 e-beam resolution의 한계로 인하여 양자점의 크기를 50nm 이하의 수준으로 만드는 데에는 문제점이 있다는 것이다.

마지막 방법으로는 자연적인 재료의 성질을 이용한 양자점 형성 공정의 개발이다. 이 방법들의 대부분은 상변태 (기체—고체 또는 액체—고체) 초기 단계에 일어나는 핵 생성 단계를 제어 함으로 인하여 양자점을 형성하는 것으로서, 그 크기나 밀도, 그리고 특히 throughput의 관점에서 현재까지의 여러 공정 중 가장 유력한 방법으로 평가된다. 문제점은 핵생성 단계에서 일어나는 제반 물리적 현상을 충분히 이해하지 못하여, 양자점의 크기나 밀도의 분포를 조절할 수 없다는 점이며 아울러 그 위치를 제어 할 수 없다는 점이다. 이 방법에 대해서는 이미 많은 연구 그룹 (Cambridge, Hitachi, IBM 등)에 의하여 초보적 수준의 연구가 이루어지고 있으며, 국내의 연구 수준도 비록 그 시작은 늦으나, 현재 상당한 수준에 도달해 있다고 할 수 있다. 이러한 기술의 세계적 기술 수준을 간단히 도표로 정리하면 <표 1>과 같다.

### 2. 양자점 형성에 관한 최근 국내외 연구결과 요약

(1) 박막 증착시 핵생성 단계를 이용한 양자점 형성  
화학기상증착법 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 또는 물리기상증착법 (Physical Vapor Deposition, PVD)에서의 박막 증착 초기 핵생성 단계를 이용한 양자점 형성 공정은 가장 보편적으로 이용되는 공정의 하나이다. 특히 Si 또는 SiGe의 양자점에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는데, 그 이유는 양자점을 이용한 SET 소자의 제작이 많은 연구자에 있어서 주요 관심사이기 때문이다. 국내외의 우수한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

Tohoku 대학의 Mikoshiba 교수팀은 SiO<sub>2</sub> 기판 위에 결정질 Si 양자점을 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 방

〈표 1〉 상변태 및 합성법 등을 이용한 양자점 형성공정의 기술 수준

제품·기술명	서술적인 내용	정량적인 내용	비고 (인용자료명)
단일전자 메모리 소자용 금속, Si 및 Si <sub>1-x</sub> Gex 양자점 형성기술	결정질 Si 증착시 초기 핵생성을 이용한 양자점 형성	결정질 Si 양자점 - size : 10nm - density : $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$	Kim et al. MNC 98, p. 136
	비정질 Si, Si <sub>1-x</sub> 증착시 초기 핵 생성을 이용한 양자점 형성	비정질 Si, Si <sub>1-x</sub> Gex 양자점 - size : 4nm - density : $1.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$	Yoon et al. J. Appl. Phys. 87, 2449(2000)
	Si <sub>1-x</sub> Gex 박막의 선택적 산화를 이용한 양자점 형성	Si <sub>1-x</sub> Gex 박막의 산화공정에 의 한 양자점 형성 - size : 3nm - density : $3 \times 10^{12}/\text{cm}^2$	King et al. IEDM 1998 p. 115
	양자점의 핵생성 및 핵성장 에 대한 시뮬레이션 알고리즘	양자점의 특성에 대한 이론적 접 근과 양자점 제조에 대한 시뮬레 이션	Thean A et al. IEEE Electron Device Letters, 20(6), 286-288, 1999
격자 불일치에 의한 화합물 반도체 양자점 형성기술	양자점 적층기술	InAs/GaAs 무결함 수직적층 양자점 형성 - 30 layers	Zhuang et al. Appl. Phys. Lett., 73, 3706(1998)
	양자점 수평/수직 배열기술	InAs/GaAs/ 수직적층시 수직방 향으로 배열된 양자점형성 - 10 layers 수직배열	Harris et al., Phys. Rev. Lett., 76, 952(1996)
	상평형장 모델을 이용하여 응력 으로 인한 surface instability 현상의 전산모사	Coarsening regime에서의 2차 원 및 3차원 전산모사	J. Muller et. al., Phys. Rev. Lett., 22(1999) 1736.
화학적 합성법을 이용한 양자점 형성기술	CdSe반도체 나노입자 : 콜로이드 화학을 이용한 II-VI 반도체 나노 입자의 제조	- 2~10nm 정도의 균일한 크기 의 나노입자 제조 - 배열의 규칙성 : $< 0.01 \mu\text{m}^2$	Alivisatos, A. P. Science 1996, 271, 933.
	Fe-Pt 자성체 나노입자 : 자기 나노입자를 제조와 기판 위에 superlattice 형성	- 2~10nm 정도의 균일한 크기 의 나노입자 제조 - 배열의 규칙성 : $\sim 0.01 \mu\text{m}^2$	Sun & Murray, Science 2000, 287, 1989.

법을 이용하여 형성하여 saturated nuclei density가  $1 \times 10^{10}/\text{cm}^2 \sim 3 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  정도가 되는 양자점 형성공정에 관한 결과를 발표하였다.<sup>[2]</sup> 그리고, 국내 KAIST의 신형철 교수 연구팀은 같은 방법을 사용하여 10nm 크기의 양자점을  $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 의 밀도로 형성하였음을 발표하였다.<sup>[3]</sup> 이와 함께, 미국 Berkeley 대학의 King 교수 그룹에서는 Si<sub>1-x</sub>Gex 박막의 선택적 산화를 이용한 Ge nanocrystals의 형성 공정을 발표하였는데, 이 공정을 이용하여 형성된 양자점의 크기

는 약 3nm 정도이고, 그 공간밀도는 약  $3.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  정도를 나타내었다.<sup>[4]</sup>

이와 더불어, 서울대학교의 본 연구팀에서는 SiO<sub>2</sub> 기판 위에 비정질 Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub> 양자점을 LPCVD 방법을 이용하여 형성한 결과를 발표하였는데, 본 공정을 이용하여 얻은 양자점의 크기는 약 3~4nm 정도이고, 공간밀도는 약  $1.5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  정도가 됨을 확인하였다.<sup>[5]</sup> 특히 이를 이용하여 EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) 형태



〈그림 1〉 Bright field TEM(Transmission Electron Microscopy) image of  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  quantum dots formed on  $\text{SiO}_2$  by LPCVD<sup>[6]</sup>

의 단일전자 메모리 소자를 제작하여 상온에서 2.4V 정도의 threshold voltage shift 값을 나타내는 소자를 구현하였다. 다음의 〈그림 1〉은 비정질  $\text{SiO}_2$  기판 위에 LPCVD법을 이용하여 형성된  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  양자점을 나타내는 명시야상 투과전자현미경 이미지이다.

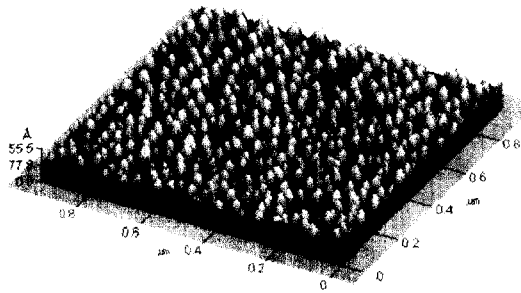
(2) 이종에피 성장에서의 격자불일치에 의한 반도체 양자점 형성기술

이종에피 성장시 일어나는 격자 불일치에 의한 양자점의 형성은 기판 위에 제어된 위치에 양자점을 형성할 수 있는 가능성과 광소자의 응용 가능성으로 인하여 활발한 연구가 수행되고 있는 분야이다. 본 공정은 Stranski-Krastanov 성장기구에 의하여 이종에피성장 과정에서 발생하는 strain에 의하여 2-dimension 성장(Layer-by-Layer growth)에서 3-dimension 성장(island growth)로 전이되는 과정을 이용한 양자점 형성공정이다. 현재까지의 대표적인 국내의 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

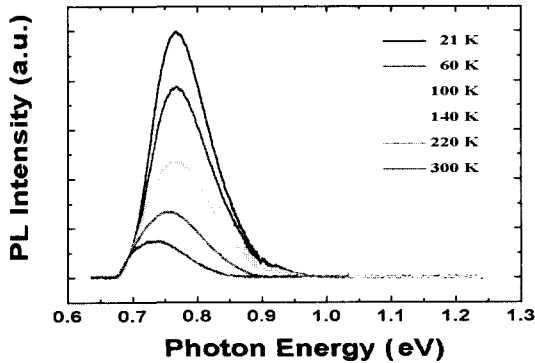
Battacharya 등<sup>[6]</sup>은 GaAs 기판 위에 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 공정을 이용하여 InAs 양자점을 형성하였으며, 양자점의 크기는 지름이 약 15nm, 높이가 약 7nm 정도를 나타내었으며, 양자점의 평균 공간밀도는  $10^{11}/\text{cm}^2$  정도의 값을 나타내었다. II-VI 족 및 III-V 족 반

도체 양자점의 응용분야로서 광소자 분야가 가장 활발하게 연구되고 있는데, 광소자에 효율적으로 적용하기 위해서는 양자점의 크기가 균일해야 할 뿐만 아니라, 높은 양자점 밀도를 얻어야만 한다. 이를 위해 활발하게 연구되고 있는 공정으로 수직적층 양자점 형성 공정을 들 수 있다. Zhuang 등<sup>[7]</sup>은 GaAs 기판 위에 InAs 양자점을 수직적층 형태로 구현하는 공정에 대해 보고하였는데, 이는 양자점의 응력분포를 이용하여 수직으로 일렬 배열된 양자점 수직적층을 구현하는 것으로서, 결합이 없는 30층의 수직적층 양자점을 형성하였고, 단일층 양자점에 비해 우수한 크기 균일도를 나타내었으며, 적외선 수광소자 및 레이저 소자에 응용가능함을 보고하였다. Bimberg 등<sup>[8]</sup>도 GaAs 기판 위에 MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 방법으로 3층의 InAs 수직적층 양자점 형성을 보고하였으며, 양자점 층이 증가할수록 양자점의 크기가 균일해지며, 그 크기가 증가하는 양상을 확인하였다.(1층 9-12nm → 3층 15-18nm) 그리고, PL(Photoluminescence) 특성을 확인한 결과에 의하여 PL 강도가 증가하였고 반가폭이 감소하는 결과를 보고하였다.

이와 더불어, 서울대 윤의준 교수팀에서는 InP 기판 위에 MOCVD를 이용한 지름이 약 50nm, 높이가 약 5nm, 공간밀도가 약  $4.5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 의 값을 나타내는 InAs 양자점을 형성하였으며, excess InAs 현상 등의 양자점 형성과정을 규명하였다.<sup>[9]</sup>



〈그림 2〉 InAs quantum dots formed on InP substrate<sup>[9]</sup>

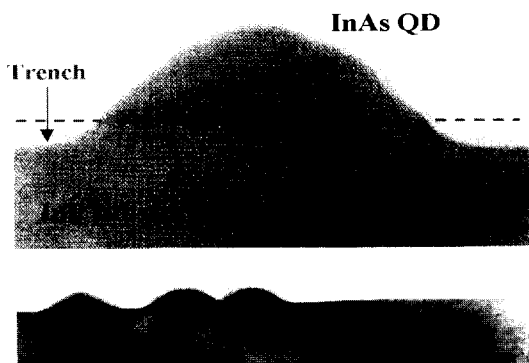


〈그림 3〉 온도변화에 따른 PL 특성 변화<sup>[9]</sup>

본 공정에 의해 형성된 양자점의 PL 특성을 확인한 바에 의하여 상온에서도 강한 PL 특성을 나타내었으며, 이를 통하여 상온에서도 동작 가능한  $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$  영역의 레이저소자의 개발이 가능함을 보고하였다. 다음의 〈그림 3〉은 본 공정에 의해 형성된 InAs 양자점의 온도에 따른 PL 특성을 나타낸 그림이다.

또한 서울대 윤의준 교수팀에서는 MOCVD를 이용한 InAs/InP 자발양자점모양을 관측하였는데, 완충막의 종류에 따른 양자점의 모양 변화와 양자점 형성 과정에서의 As/P exchange 현상에 관하여 보고하였다. 다음의 〈그림 4〉는 InAs/InP 구조에서의 양자점 모양을 TEM을 이용하여 관찰한 결과이다.

이종에피성장 과정에서 형성되는 양자점에 관한 실험적 연구 이외에, 박막 성장시 발생하는



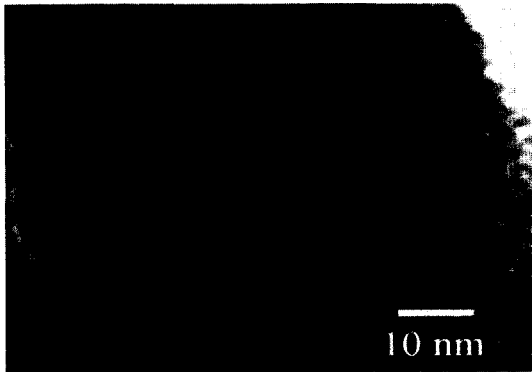
〈그림 4〉 InAs/InP 양자점 TEM 결과

strain field를 전산모사하는 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 양자점 형성에 관한 전산모사 연구로는 미국 Michigan 대학의 Srolovitz 교수팀, 미국 Northwestern 대학의 Voorhees 교수팀, 영국 Cambridge 대학의 Spencer 박사, 그리고 Canada McGill 대학의 Grant 교수 등이 응력에 의한 surface instability, 에피박막 형상변화의 2차원 및 3차원 전산모사를 위한 상평형장 모델 적용 등에 관한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

### (3) 화학적 합성법을 이용한 양자점 형성에 관한 연구

앞서 설명한 박막 증착시 초기단계의 핵생성을 이용하는 공정과 이종에피 성장과정에서의 양자점 형성은 기판 위에 박막을 증착하는 과정에서 양자점을 형성하는 공정인데 반해, 본 절에서 설명하는 공정은 액상에서 고상으로의 상변태시 일어나는 핵 생성 단계를 제어하여 양자점을 액상 내에 형성하는 공정이다. 이 방법은 기판 위에 직접 양자점을 형성하는 공정이 아니기 때문에, 이를 이용하여 기판 위에 양자점을 배열하기 위해서는 양자점 전달과 관련된 공정이 추가로 요구되나, 상변태가 기상에서 고상으로 이루어지는 것이 아니고 액상에서 고상으로 이루어지기 때문에 전체적인 공정 제어가 위의 두 방법에 비해서는 우수할 수 있는 장점이 있다. 본 과제에 대해 현재 진행되고 있는 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

Bawendi 교수팀에서는 TOPO(Tri-n-OctylPhosphine Oxide) 계면활성제를 이용하여 다양한 크기의 CdS, CdSe, CdTe 양자점을 형성하였다.<sup>[10]</sup> 이 공정을 이용하여 형성된 양자점의 크기는 2~8nm 정도의 값을 나타내었다. 이와 더불어, IBM의 Murray 박사 연구팀에서는 동일한 TOPO 계면활성제를 이용하여 6nm 크기의 Co 양자점과 Fe-Pt alloy 양자점을 형성하였고, 이를 이용하여 superlattice를 제조하였다.<sup>[11]</sup>



〈그림 5〉 Fe quantum dots formed by chemical synthesis using TOPO surfactant<sup>[12]</sup>

그리고, 서울대 현택환 교수팀은 TOPO 계면활성제를 이용하여 2nm 크기의 Fe 양자점을 형성하였음을 보고하였다.<sup>[12]</sup> 다음의 〈그림 5〉는 본 공정을 이용하여 제조한 Fe 양자점을 나타낸 그림이다.

### III. 결 론

양자점 형성 공정은 차세대 나노소자의 개발에 핵심적인 요건이 되고 있으며, 양자점 형성 공정의 개발을 위하여 다양한 방법들이 제안되어 연구되고 있다. 양자점 형성에 있어서 요구되는 조건으로는 양자점의 크기가 수 나노미터 수준이 되어야함과 아울러 양자점의 밀도를 증가시키고 그 분포를 제어할 수 있어야한다는 점이다. 이와 더불어, 나노소자의 대량생산을 고려할 경우, 양자점 형성공정 또한 우수한 생산성이 확보되어야 한다는 요건도 포함하게 된다. 이를 정리하면, 양자점 형성공정 개발의 최종적인 목표는 수 나노미터의 균일한 크기를 갖는 양자점을 원하는 위치에 균일하게 배열할 수 있는 공정을 개발함에 있으며, 이는 대량생산 공정을 고려하여 우수한 생산성을 확보하며 이루어져야 한다. 현재까지 제안된 다양한 공정들 중에서 아직 이러한 요건

을 모두 만족하는 공정은 개발되어 있지 않은 상황이다. 현재까지 양자점 형성에 관한 연구결과를 보면 AFM, STM 등의 probe를 이용한 양자점 형성이나 e-beam patterning 등을 이용한 공정은 양자점의 크기와 배열을 제어할 수 있다는 장점이 있는 반면, 아직 현재의 기술 수준으로는 수 나노미터 크기의 양자점 형성이 어려운 상황이며 생산성이 낮다는 단점을 갖고 있다. 반면, 박막의 핵생성을 이용한 양자점 형성, 이종에 피성장 과정에서의 격자불일치에 의한 양자점 형성, 화학적 합성법을 이용한 양자점 형성 공정은 형성가능한 양자점의 크기가 수 나노미터 수준이며 우수한 생산성을 지니고 있어 대량생산에 적용하기에 용이한 반면 양자점의 크기와 배열을 제어하기가 어렵다는 단점을 나타내고 있다. 이는 현재까지의 기술수준으로는 어떠한 방법이 가장 적합한 것이지에 관해 단정하기 힘든 상황이며 현재 다양한 방법들이 지속적으로 제안되어 연구되고 있다. 따라서, 양자점 형성공정의 성공적인 개발을 위해서는 이론적으로는 양자점 형성 원리를 규명하고 이를 바탕으로 양자점의 크기 및 분포를 제어하기 위한 다양한 실험적 접근이 요구된다. 이를 위해서는 기존의 마이크로 단위의 공정의 개념에서 벗어나 새로운 패러다임으로 다양한 아이디어의 제시와 이에 관한 체계적이고 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Grabert and M. H. Devoret, "Single Charge Tunneling ; Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures", Plenum, New York, p.311, 1992.
- [2] M. Kato, T. Sato, J. Murota, and N. Mikoshiba, "Nucleation Control of Silicon on Silicon Oxide for Low-Temperature CVD and Silicon Selective Epitaxy", J. Cryst. Growth, 99, p. 240, 1990.

- [3] I. Kim, H. Kim, J. Lee, and H. Shin, "Fabrication of Silicon Quantum Dots on Oxide and Nitride", Digest of papers Microprocesses and Nanotechnology '98, p.136, 1998.
- [4] Y. King, T. King, and C. Hu, "MOS Memory Using Ge Nanocrystals Formed by Thermal Oxidation of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ", IEDM 1998, p.115.
- [5] TaeSik Yoon, Jang-Yeon Kwon, Dong-Hoon Lee, Ki-Bum Kim, Seok-Hong Min, Dong-Hyuk Chae, Dae Hwan Kim, Jong Duk Lee, Byung-Gook Park, Hwack Joo Lee, "High Spatial Density Nanocrystal Formation Using Thin Layer of Amorphous  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  Deposited on  $\text{SiO}_2$ ", J. Appl. Phys. 87(5), p.2449, 2000.
- [6] J. Phillips, K. Kamath, X. Zhou, N. Chervela, and P. Battacharya, "Photoluminescence and Far-infrared Absorption in Si-doped Self-organized InAs Quantum Dots", Appl. Phys. Lett. 71(15), p.2079, 1997.
- [7] Q. D. Zhuang, J. M. Li, H. X. Li, Y. P. Zeng, L. Pan, Y. H. Chen, M. Y. Kong, and L. Y. Lin, "Intraband Absorption in the 8-12 $\mu\text{m}$  Band from Si-doped Vertically Aligned InGaAs/GaAs Quantum-dot Superlattice", Appl. Phys. Lett. 73(25), p.3706, 1998.
- [8] F. Heinrichsdorff, M.-H. Mao, M. Kristaedter, A. Krost, D. Bimberg, A. O. Kosogov, and P. Werner, "Room-temperature Continuous-wave Lasing from Stacked InAs/GaAs Quantum Dots Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition", Appl. Phys. Lett. 71(1), p.22, 1997.
- [9] S. Yoon, Y. Moon, T.-W. Lee, E. Yoon, and Y. D. Kim, "Effects of As/P Exchange Reaction on the Formation of InAs/InP Quantum Dots", Appl. Phys. 74(14), p.2029, 1999.
- [10] C. B. Murray, D. J. Norris, and M. G. Bawendi, "Synthesis and Characterization of Nearly Monodispersed CdE (E=S, Se, Te) Semiconductor Nanocrystallites", J. Am. Chem. Soc. 115, p.8706, 1993.
- [11] S. Sun, C. B. Murray, D. Weller, L. Folks, and A. Moser, "Monodisperse FePt Nanoparticles and Ferromagnetic FePt Nanocrystal Superlattices", Science, 287, p.1989, 2000.
- [12] S.-J. Park, S. Kim, S. Lee, Z. G. Khim, K. Char, and T. Hyeon, "Synthesis and Magnetic Studies of Uniform Iron Nanorods and Nanospheres", J. Am. Chem. Soc. (to be published).

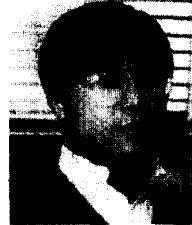
## 저자 소개



尹泰植

1972년 11월 12일생, 1996년 2월 서울대학교 금속공학과(공학사), 1998년 2월 서울대학교 금속공학과(공학석사), 1998년~현재: 서울대학교 재료공학부 박사과정 재학 중, <주관심 분야:

양자점 형성공정 및 단일전자소자>



金起範

1956년 7월 16일생, 1980년 2월 서울대학교 금속공학과(공학사), 1983년 서울대학교 금속공학과(공학석사), 1990년 Stanford University, Materials Science and Engineering(박사), 1988

~1991년: Philips Research Laboratory, Research Scientist, 1991~1992년: Applied Materials Inc., Research Scientist, 1992년~현재: 서울대학교 재료공학부 교수, <주관심 분야: 나노테크놀로지, 금속배선공정>