

GaN 계열 양자점 소자 연구 동향

김 현 진, 윤 의 준
서울대학교 재료공학부

I. Introduction

Si의 이용에 제한이 따르는 고속소자와 광소자를 구현하기 위한 노력은 화합물 반도체소자를 통해서 이루어지고 있다. 또한 대부분의 화합물 반도체 소자들은 밴드갭 엔지니어링을 통한 양자 효과를 소자구조에 이용하고 있으며, 실용화된 소자들은 가장 초보적인 단계의 양자구조인 양자우물(quantum well)을 사용하고 있다. 그러나, 소자의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 2차원적인 양자우물에서 보다 높은 수준의 양자구조인 1차원적인 양자선(quantum wire), 0차원적인 양자점(quantum dot) 등으로 양자구조의 차원을 더욱 줄여야 하는 필요성이 이론적으로 예측 가능하다. 실제로 1982년에 Y. Arakawa에 의해 물질이 수십 nm 수준에서 저차원적으로 형성될 경우 독특한 물리적 현상을 가지고, 이를 이용할 경우 양자우물보다 좋은 광학적 성질을 가질 수 있음이 이론으로 제안^[1]된 이후, 양자점 연구는 활성화되었다.

GaN, InN, AlN의 III-V족 질화물 반도체는 자외선 영역에서 가시광선 영역 뿐 아니라 적외선 영역까지 발광파장을 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 이종구조에서 금지대폭 및 굴절률의 차이가 크고 직접천이형 밴드구조를 지니기 때문에 광특성이 우수한 장점을 지니고 있다. 또한 녹는 점이 높아 고온에서 안정하며 열전도도가 크고 화학적으로 안정할 뿐만 아니라 포화전자 이동속도가 크고 기계적 강도가 우수한 여러 가지 특성

을 지니고 있다. 따라서 III-V족 질화물 반도체를 이용하여 laser diode(LD), light emitting diode(LED) 등의 발광소자 이외에도 자외선 photodetector, 고온 고출력 전력 소자, field effect transistor (FET) 등의 여러 분야로의 응용을 모색하는 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.^[2]

양자점 구조를 이용한 III-V족 질화물 반도체 소자의 가능성은 여러 경로를 통해 확인될 수 있다. 질화물 반도체 LD 및 LED의 활성층 용 소재로 쓰이는 InGaN의 경우 상분리 현상으로 인해 형성된 불균일한 조성 영역에서 양자점과 비슷한 국소 준위가 형성됨으로써 박막 자체의 높은 결합밀도에도 불구하고 우수한 광특성을 보이는 현상이 보고된 바 있다. 따라서 양자점 성장을 통해 인위적으로 국소준위를 구현해 줄 경우 보다 용이한 발광특성의 제어 및 발광특성의 향상에 대한 가능성이 제시된 바 있다.^[2] 또한 양자점 구조를 GaN 계열 LD 구조에 적용할 경우 GaN 계열 LD의 가장 큰 문제점 중의 하나인 높은 문턱전압을 거의 GaAs 계열 LD 수준까지 낮게 할 수 있는 가능성이 이론적으로 제기된 바 있다. 또한 최근 들어 차세대 조명용 소자로서 주목을 받고 있는 UV LED의 경우 활성층 용 소재로 쓰이는 낮은 In 조성의 InGaN 및 GaN, AlGaN에서는 상분리 형성을 통한 자발적 국소준위 형성을 기대할 수 없기 때문에 양자점 형성을 통한 발광 특성 향상의 가능성이 높게 기대될 수 있다.

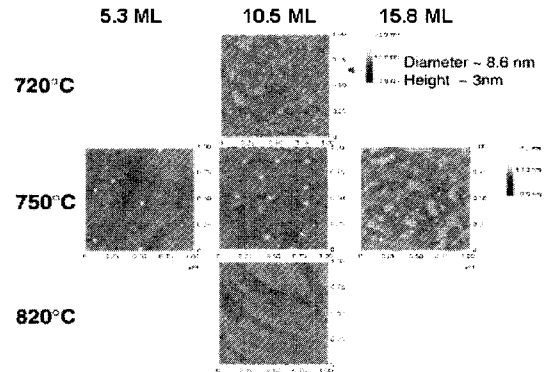
현재 III-V족 질화물 계열 양자점 관련 연구는 주로 소자 제작 이전의 양자점 구조 구현 단계에

그 초점이 맞추어져 있으며 소자에 대한 연구는 optical pumping을 통한 lasing 동작이 가능한 양자점 LD 구조 구현 수준에 머무르고 있다. 이는 III-V족 질화물 계열 물질 성장의 어려움으로 인하여 상대적으로 늦은 시기인 1990년대 중반 이후부터 연구가 활발히 이루어져서 아직 충분한 연구가 이루어지지 않은데 기인한 바가 크다. 양자점을 구현하고자 하는 연구는 Stranski-Krastanow(S-K) 성장모드를 이용한 자발 형성 양자점 구현 방법, anti-surfactant를 이용한 양자점 구현 방법, patterning 및 selective growth를 이용한 양자점 구현 방법의 세 가지 방향으로 나눌 수가 있다. 본 논문에서는 이상의 세 가지 측면에서 III-V족 질화물 계열 양자점 구조 구현에 대한 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

II. S-K 성장모드를 이용한 자발 형성 양자점 구현 연구

박막의 표면 에너지가 작고 기판에 대해 격자 불일치가 클 때, 초기에 2차원적인 성장양상을 보이다가 일정 두께 이상이 되면 격자불일치에 의한 변형에너지를 이완하기 위하여 2차원적(2 dimensional : 2D) wetting layer 위에 3차원적(3 dimensional : 3D)인 island가 형성된다. 이를 이용하여 기판과 박막 사이의 격자불일치를 조절할 경우 자발형성 양자점을 구현할 수 있다. 특히 S-K 성장모드를 이용하여 초기 성장모드를 미세하게 조절할 경우 기판과의 pseudomorphic 한 상태를 유지한 상태에서의 양자점 성장이 가능해지기 때문에 보다 우수한 결정성을 지니는 양자점 구현이 가능해진다.

III-V족 질화물의 경우 AlN와 GaN 사이에 약 3%, GaN와 InN 사이에 약 10%의 격자 불일치가 존재한다. 이를 이용하여 GaN/AlGaIn이나 InGaIn/GaN 등의 구조를 성장하며 조성

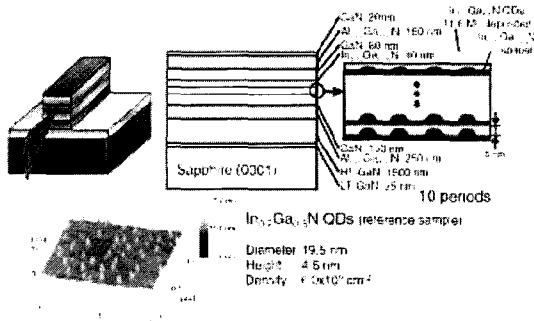


〈그림 1〉 AFM으로 관찰한 성장온도 및 InGaIn 두께에 따른 InGaIn 양자점 표면 형상의 변화^[3]

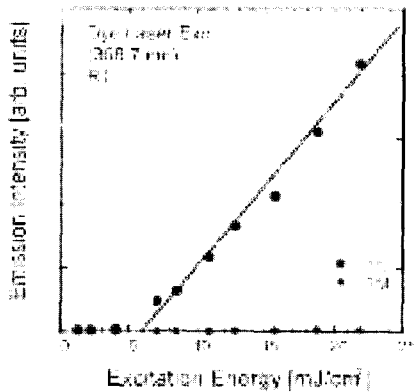
조절을 통하여 격자 불일치를 조절해 줄 경우 S-K 성장모드를 통한 자발형성 양자점의 구현이 가능해진다.

Univ. of Tokyo의 Arakawa 등은 유기금속화학기상증착법(metalorganic chemical vapor deposition : MOCVD) 성장법을 이용하여 GaN 박막 위에 InGaIn 양자점 성장을 보고하였다.^[3] 이들은 약 20% 정도의 InN 조성을 지니는 InGaIn 박막을 증착하여 양자점 성장을 시도하였으며 성장 온도와 coverage를 조절하여 성장양상을 조절하였다. 〈그림 1〉에 성장 온도 및 coverage에 따른 표면 형상의 변화를 AFM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 이에 따르면 성장 온도를 감소시키거나 coverage를 증가시키면 양자점의 밀도는 $2 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 까지 증가하는 양상을 나타내었다. 특히 성장온도를 감소시키는 경우 양자점의 크기는 $8.9\text{nm} \times 2.1\text{nm}$ 까지 감소하는 결과를 보였다. 일반적으로 양자점 성장에서 성장온도를 감소시키는 경우 핵생성 촉진 및 표면에서의 흡착 원자의 이동도 감소의 효과를 예측할 수 있는데 이들의 결과도 이와 같은 효과에서 기인한 것으로 생각되어진다.

한편 이들의 결과에서는 S-K 성장모드의 증거로써 제시될 수 있는 coverage에 따른 2D 성장 모드에서 3D 성장모드로의 변화는 관찰되지 않았는데 이는 이들이 성장한 InGaIn의 InN 조성



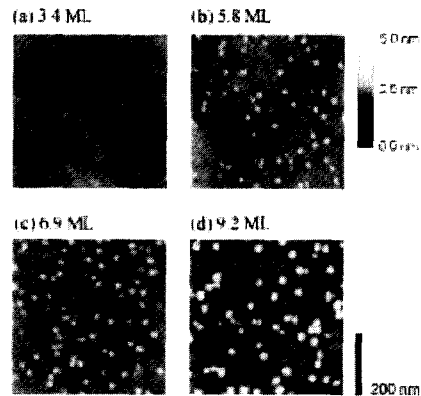
〈그림 2〉 적층 InGaN 양자점을 이용한 LD 구조^[3]



〈그림 3〉 여기 에너지 증가에 따른 LD 구조에서의 발광세기의 변화^[3]

이 높아서 워낙 격자불일치가 큰 환경으로 인해 처음부터 3D 성장모드를 보였거나 아니면 2D 성장양상에서 3D 성장양상으로 전이하는 임계두께가 매우 얇아서 이들의 관찰 범위에서는 나타나지 않은 것으로 생각되어진다.

Arakawa 등은 이와 같이 얻어진 양자점 구조를 이용하여 적층 양자점 구조를 구현하여 발광 특성을 향상시킬 수 있었다.^[3] 그리고 이러한 적층 양자점 구조를 이용하여 LD 구조를 구현한 후 optical pumping을 시도하였다. 〈그림 2〉에 이들이 구현한 LD 구조를 나타내었다. Dye laser를 이용하여 여기에너지를 증가시키며 optical pumping을 시도한 결과 〈그림 3〉에서와 같은 발광 세기의 급격한 증가를 통해 lasing 현상을 관찰할 수 있었다. 이들이 구현한 LD 구조에



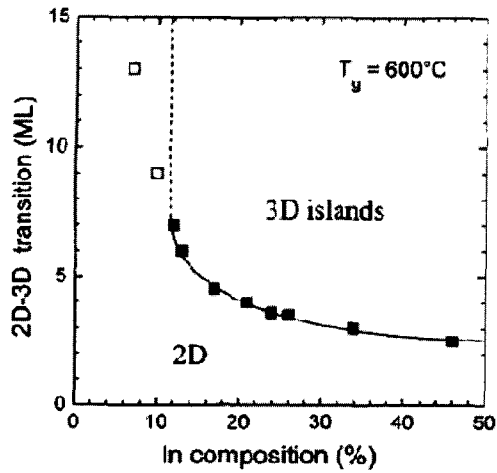
〈그림 4〉 AFM으로 관찰한 두께 증가에 따른 GaN 양자점의 표면형상 변화^[4]

서의 lasing 현상은 발광 세기의 증가 시 발광 파장의 narrowing 현상이 나타나는 것에서도 확인할 수 있었다.

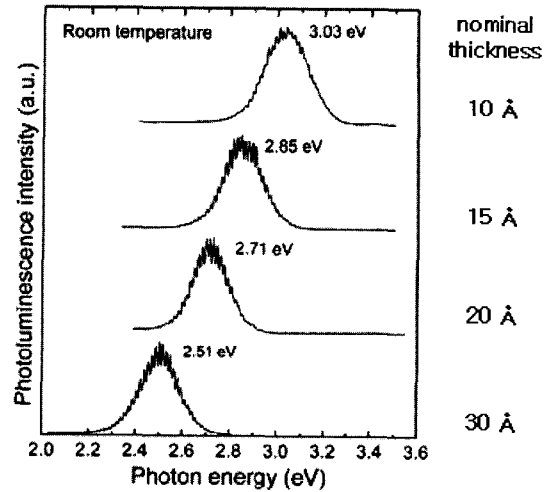
Arakawa 등은 이외에도 MOCVD를 이용한 AlN 박막 위의 GaN 양자점 성장에 대해서도 보고하였다.^[4] 이들은 MOCVD 성장시 암모니아의 유입 유량을 줄여서 일반적인 GaN 성장분위기에 비해 극단적으로 낮은 V/III 비를 갖는 분위기 아래에서 GaN 양자점을 성장하였다. 이는 표면에서의 Ga 원자의 과포화도를 높여서 보다 핵생성을 원활히 하기 위한 것으로 추측된다. 그 결과 〈그림 4〉의 AFM 사진에서와 같이 2D 성장모드에서 3D 성장모드로의 전환이 뚜렷하게 드러나는 양자점 성장을 구현할 수 있었다.

Molecular beam epitaxy (MBE)를 이용한 자발형성 양자점 구현 결과도 다수 보고되고 있다. 성장 방법으로 MBE를 사용하는 경우 reflection of high energy electron diffraction (RHEED)와 같은 실시간 측정법을 이용하여 2D 성장모드에서 3D 성장모드로의 전이점을 보다 수월하게 찾아낼 수 있어 박막의 초기 성장 모드 및 양자점의 성장 양상을 제어하는데 용이하다는 장점이 있다.

CNRS의 Grandjean 등은 MBE 방법으로 GaN 위에 InGaN 박막을 성장하면서 각기 다른 조성의 InGaN 박막의 두께에 따른 성장 양상의 변화를 RHEED를 사용하여 관찰하였다.^[5]



〈그림 5〉 600°C에서 성장한 InGaN의 In 조성에 따른 2D 성장모드에서 3D 성장모드로의 전환 임계 두께의 변화.^[6]



〈그림 6〉 양자점 두께에 따른 PL 발광 파장의 변화^[6]

RHEED 결과로부터 이들은 〈그림 5〉와 같이 각 InGaN 조성별로 2D에서 3D로의 성장모드 전이가 일어나는 임계두께를 구해낼 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 양자점 성장을 시도한 결과 scanning tunnelling microscope (STM) 을 사용하여 고해상도 분석을 시도한 경우 $10^{12}/\text{cm}^2$ 의 밀도와 $10\text{nm} \times 2\text{nm}$ 의 평균크기를 지니는 InGaN 양자점을 성장할 수 있었다.

일반적으로 보고되는 양자점의 aspect ratio 를 보면 그 반경에 비해 높이가 대단히 작다. 따라서 높이 방향으로의 carrier confinement 효과가 더 월등하게 나타나서 높이에 의해 발광파장이 결정되는 경우가 많다. 이를 이용하면 양자점의 높이 변화를 통한 발광 파장의 조절 가능성을 예측할 수 있다. Grandjean 등의 결과에서도 양자점의 높이를 조절함으로써 발광파장이 변화하는 것이 보고되었다. 〈그림 6〉에 나타난 PL 결과에서 보면 양자점의 높이가 1nm에서 3nm 까지 증가함에 따라 발광 에너지가 3.03eV에서 2.51eV까지 변화하는 결과를 관찰할 수 있고 이로부터 양자점의 크기 조절을 통한 발광 소자의 파장 조절 가능성을 확인할 수 있다.

CEA-Grenoble의 Adelman 등도 MBE 방법을 사용한 AlN 박막 위의 GaN 양자점 및

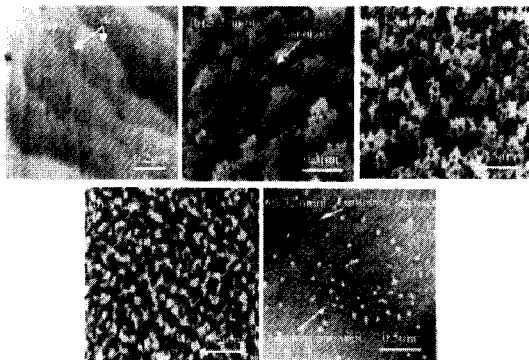
GaN 박막 위의 InGaN 양자점 구현에 대해 보고하였다.^[6] AlN 박막 위에 GaN 양자점을 성장한 경우 $8\text{nm} \times 2\text{nm}$ 의 크기를 지니고 $10^{11}/\text{cm}^2$ 대의 밀도를 지니는 양자점을 얻을 수 있었으며 특히 양자점의 크기 조절을 통해 발광 파장이 큰 폭으로 변하여 자외선 및 가시광선 전 영역에 걸친 발광파장을 획득할 수 있었다. 이는 III-V 족 질화물 반도체의 구조적 특성상 예측되는 높은 piezoelectric field로 인한 Quantum Confined Stark Effect (QCSE)에서 기인한 것으로 생각되어진다. 그러나 이와 같은 높은 piezoelectric field는 역으로 발광 효율을 저하시키는 측면이 있고 또한 AlN를 기판으로 사용할 경우 doping이 어렵다는 단점이 존재하여 이는 AlN 박막 위의 성장한 GaN 양자점의 소자로의 적용을 어렵게 하고 있다.

한편, 이들이 성장한 InGaN 양자점의 경우는 AFM 분석 결과 $27\text{nm} \times 3\text{nm}$ 의 크기와 $9 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 의 밀도를 지니는 것으로 관찰되었으며 25% InN 조성의 InGaN 양자점을 증착한 경우 3D 성장으로 전환되는 임계두께는 약 2ML 정도로 측정되었다. 이는 앞서 언급한 Grandjean 등의 결과에 비해 상대적으로 얇은 두께인데 이는 성장 온도의 차이, InGaN의 조성 분석의 부정확성 등에서 기인한 것으로 생각되어진다.

III. Anti-surfactant를 사용한 양자점 구현 연구

In, Si 등의 anti-surfactant를 사용한 양자점 구현에 대해서도 보고되고 있다. 박막 성장 직전에 anti-surfactant를 반응기에 공급하여 성장 표면의 전처리를 시도하는 경우 이후에 성장되는 박막은 3D 성장양상을 보이게 되어 양자점의 성장이 가능해진다. anti-surfactant를 사용하는 경우 기관의 조성 조절을 통한 인위적인 격자불일치의 형성으로부터 보다 자유로울 수 있게 되어 doping이 용이한 낮은 Al 조성의 AlGaIn 박막 위에서도 AlGaIn 및 GaN 양자점의 성장이 가능해지므로 소자 응용에 유리하게 된다. 이와 같은 anti-surfactant의 작용 원인으로는 박막의 계면 에너지의 변화, 표면에서의 흡착 원자의 diffusion length의 감소 등을 통한 3D 성장모드의 촉진이 제시되고 있다.

RIKEN의 Aoyagi 등은 Si를 anti-surfactant로 사용하여 AlGaIn 박막 위에 AlGaIn, GaN 및 InGaIn 양자점 구현을 보고하였다.^[7] 이들은 일반적으로 GaN 성장에 기관으로 사용되는 사파이어 기관 대신에 6H-SiC 기관을 사용하였고 그 위에 AlGaIn을 성장한 후 1100°C 이상의 고온에서 TESi를 공급하여 표면 전처리



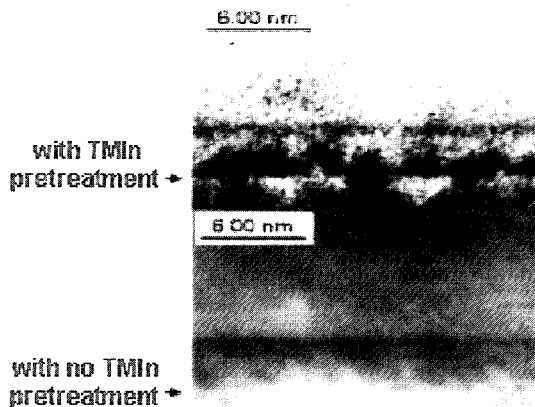
〈그림 7〉 AFM으로 관찰한 TESi 유입량 증가에 따른 GaN 표면의 변화(좌측 윗부분부터 시계방향으로 각각 TESi 유입량 0, 3.2, 4.8, 8.1, 32 nmol)^[7]

를 행한 후 양자점을 성장하였다.

〈그림 7〉에 TESi 유입량에 따른 성장 박막의 표면 형상의 변화를 나타내었다. TESi의 유입량을 증가시킨 결과 2D 성장모드에서 3D 성장모드로 변화하는 양상을 관찰할 수 있었다. 이들은 이 방식을 이용하여 InGaIn의 경우 약 $10^{11}/\text{cm}^2$ 의 밀도와 $10\text{nm} \times 5\text{nm}$ 의 크기를 지니는 양자점을 얻을 수 있었다.

이들이 성장한 양자점의 경우 그 발광은 양자우물구조에서의 발광에 비해 세기가 증가한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 크기의 변화를 통한 발광파장의 조절 결과는 보여주지 못하였고 대신에 조성 변화를 통한 발광파장의 조절 결과를 제시하였다. 그 결과 InGaIn 양자점 같은 경우 조성에 따라서 발광 에너지가 2.5eV에서 3.0eV까지 변하는 상온 PL 결과를 얻을 수 있었다.

이 외에 In을 anti-surfactant로 사용한 결과 역시 보고되고 있다. National Univ. of Singapore의 Zhang 등은 InGaIn 양자우물 성장 직전 TMIIn을 이용하여 표면 전처리를 행한 결과 〈그림 8〉에 나타난 TEM 사진과 같이 양자점과 비슷한 크기의 조성 불균일 현상을 유도해 낼 수 있었다.^[8] 이와 같은 조성 불균일 영역의 크기는 대략 $4\text{nm} \times 1.5\text{nm}$ 정도로 측정되었다. 이들은



〈그림 8〉 InGaIn 양자점의 TEM 사진
(a) TMIIn 전처리를 한 경우
(b) TMIIn 전처리를 하지 않은 경우

이와 같이 형성된 InGaN 양자점 구조의 PL 분석을 통해 발광 파장이 양자우물 구조에 비해 적색 영역으로 크게 전이한 사실을 발견하였다. 이는 양자점이 형성되는 경우 예상되는 청색 영역으로의 전이와는 반대의 현상인데 이와 같은 현상의 원인으로서는 InGaN 양자점 내의 In 조성의 증가, 양자우물 구조에 비한 크기의 증가 등을 생각해 볼 수 있다.

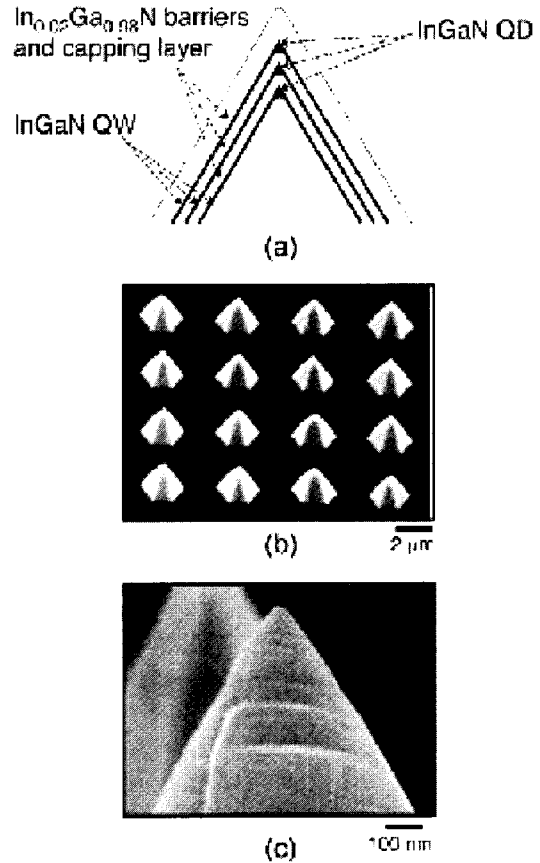
IV. Selective epitaxy를 이용한 양자점 구현 연구

GaN 박막의 Selective epitaxy란 patterning 등을 통해 기판의 일부 영역에서만 우선적으로 성장이 일어나게끔 조절하여 특수 3D 구조물을 성장하거나 실전위 밀도를 줄이는 기술이다. 양자점 구현에 이용하고자 하는 기술은 selective epitaxy를 이용한 GaN pyramid 구조물의 성장 기술이다.

성장 조건의 조절을 통해 GaN 박막의 각 결정방향으로의 성장 속도를 개별적으로 조절할 수 있고 이로부터 GaN pyramid 구조물의 구현이 가능하다. 또한 표면의 patterning을 행할 경우 성장 영역의 조절이 가능하고 이로부터 성장된 GaN pyramid 구조의 위치와 밀도를 조절할 수 있게 된다. 이와 같이 성장된 GaN pyramid 위에 양자우물구조를 성장할 경우 <그림 9>의 (a)와 같이 pyramid의 꼭지부분은 0차원적인(0 dimensional : 0D) 구조를 갖게 되고 이 구조에서 양자점의 특성을 기대할 수 있게 된다.

이 방법은 기존의 S-K 성장모드를 이용한 자발 형성 양자점 구현방법과 비교할 때 양자점 결정성의 저하를 막으면서 양자점 분포의 인위적인 조절이 보다 용이하다는 장점이 있다. 이와 같은 경우 양자점 밀도는 patterning 기술에 크게 의존하게 된다.

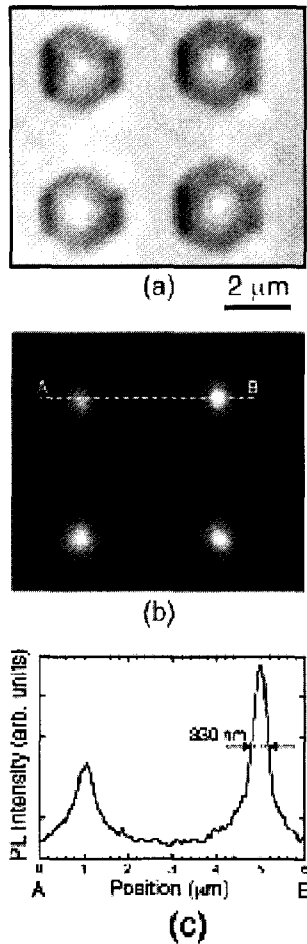
Arakawa 등은 전형적인 photo lithography 공정을 이용하여 앞서 서술한 바와 같은 selec-



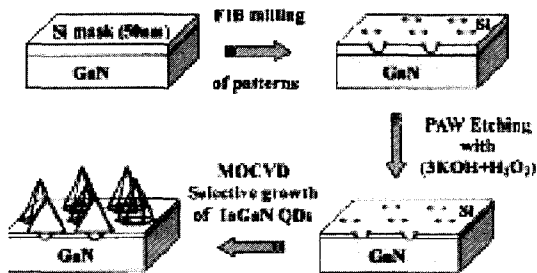
<그림 9> (a) Selective epitaxy를 통해 성장된 GaN pyramid 및 그 안에 구현된 InGaN 양자점의 구조 (b), (c) 구현된 GaN pyramid의 SEM 사진^[3]

tive epitaxy 공정을 행하였고 이를 통하여 <그림 9>의 (b), (c)와 같은 GaN pyramid array를 구현하였다.^[3] 그리고 그 위에 InGaN 다중양자우물 구조를 성장함으로써 InGaN 양자점을 구현할 수 있었다. 이들은 성장한 InGaN 양자점을 micro PL로 분석하여 <그림 10>과 같이 양자점이 위치한 부분에서만 발광이 일어나는 것을 확인하였고 이로부터 양자점이 성공적으로 구현되었음을 확인할 수 있었다.

그러나 Arakawa 등이 발표한 결과는 전형적인 photolithography 공정을 사용함으로써 충분히 미세한 공정을 수행할 수 없었고 그 결과 앞서 S-K 성장모드를 이용한 자발형성 양자점



〈그림 10〉 (a) GaN pyramid array의 현미경 사진
 (b) InGaN 양자점의 micro-PL 사진
 (c) 위치에 따른 PL spectra^[3]



〈그림 11〉 FIB/MOCVD 방법을 통한 양자점 구현 process의 개략도^[9]

구현에 비해 대단히 낮은 양자점 밀도를 얻을 수 밖에 없었다. 보다 양자점의 밀도를 높이기 위해선 GaN 성장에 특화된 미세 patterning 공정의 도입이 요구된다.

Univ. of Tokushima의 Sakai 등은 focussed ion beam(FIB)/MOCVD 공정을 도입하여 고밀도의 InGaN 양자점의 구현을 시도하였다.^[9] 〈그림 11〉에 FIB/MOCVD 공정을 통한 selective epitaxy 공정의 개략도를 나타내었다. 이들은 이를 통해 S-K 성장모드를 이용한 자발 형성 양자점에 비견할만한 $2.5 \times 10^9/\text{cm}^2$ 의 밀도를 지니는 양자점의 구현에 성공하였다. 그러나 이들이 구현한 양자점의 광학적 특성은 상대적으로 떨어져서 저온 CL 측정에서만 발광이 확인될 수 있었다. 이는 이들의 MOCVD 성장법 자체의 한계로 인하여 성장된 InGaN 결정성이 그다지 우수하지 않았기 때문으로 추측된다. 향후 MOCVD 성장법의 개선이 이루어질 경우 우수한 발광특성을 지니는 균일한 양자점의 구현이 가능할 것으로 생각되어진다.

V. Summary

지금까지 GaN 계열 물질의 양자점 소자 관련 연구 동향을 양자점 구현 방식을 중심으로 하여 살펴보았다. GaN 계열 물질의 양자점을 구현하는 방법은 S-K 성장모드를 이용한 자발형성 양자점 구현법, anti-surfactant를 이용하는 방법, selective epitaxy를 이용한 양자점 구현법 등이 시도되고 있다. 현재 GaN 계열 물질의 양자점 소자 연구는 아직 충분한 연구가 이루어지지 않은 관계로 optical pumping을 통한 LD lasing 구현에 머무르고 있는 실정이다.

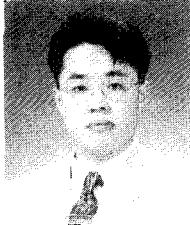
후 소자로의 응용을 위해서는 여러 가지 문제점이 해결되어야 한다. 우선 우수한 결정성을 지니는 양자점의 성장이 이루어져야 한다. 이외에도 각 구현 방법 별로 GaN 및 AlGaIn 양자점 성장용 기판으로 많이 사용되는 GaN

조성의 AlGaN 및 AlN의 doping 기술 개발, patterning 기술의 개선을 통한 미세 공정 개발 등의 여러 가지 과제들이 남아있다. 그러나, 양자점이 지닌 우수한 특성과 이를 이용한 높은 응용 가능성을 고려할 때 GaN 계열 양자점 소자의 전망은 밝다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* 40 (11), 939 (1982)
- [2] S. C. Jain, M. Willander, J. Narayan, R. Van Overstraeten, "III-nitrides : Growth, characterization, and properties", *J. Appl. Phys.* Vol. 87, 965 (Feb. 2000)
- [3] Y. Arakawa, T. Someya, K. Tachibana, "Progress in Growth and Physics of Nitride-Based Quantum Dots", *phys. stat. sol. (b)* Vol. 224 (1) 1 (2001)
- [4] M. Miyamura, K. Tachibana, Y. Arakawa, "High-density and size-controlled GaN self-assembled quantum dots grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 80 (21) 3937 (May 2002)
- [5] B. Damilano, S. Veziari, N. Grandjean, J. Massies, "Strong carrier localization in GaInN/GaN quantum dots grown by molecular beam epitaxy", *Jpn. J. Appl. Phys. part 2* Vol. 38 (12A) L1357 (Dec. 1999)
- [6] C. Adelmann, J. Simon, G. Feuillet, N. T. Pelekanos, B. Daudin, G. Fishman, "Self-assembled InGaN quantum dots grown by molecular-beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 76 (12) 1570 (Mar. 2000)
- [7] S. Tanaka, I. Suemune, P. Ramvall, Y. Aoyagi, "GaN quantum structures with fractional dimension-from quantum well to quantum dot", *phys. stat. sol. (b)* Vol. 216, 431 (1999)
- [8] J. Zhang, M. Hao, P. Li, S. J. Chua, "InGaN self-assembled quantum dots grown by metalorganic chemical-vapor deposition with In as the antisurfactant", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 80 (3) 485 (Jan. 2002)
- [9] M. Nachab, M. Nozaki, J. Wang, Y. Ishikawa, Q. Fareed, T. Wang, T. Nishikawa, K. Nishino, S. Sakai, "Selective fabrication of InGaN nanostructures by the focussed ion beam/metalorganic chemical vapor deposition process", *J. Appl. Phys.* 87 (3) 1374 (Feb. 2000)

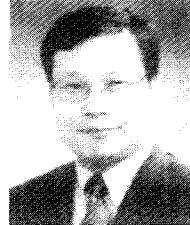
저자 소개



및 분석>

金 炫 禎

1997년 2월 서울대학교 무기재료 공학과 공학사, 1999년 2월 서울대학교 무기재료공학과 공학석사, 2001년 2월 서울대학교 재료공학부 박사과정 수료, <주관심 분야: 질화물 반도체 에피성장



尹 義 垓

1983년 2월 서울대학교 금속공학과 공학사, 1985년 2월 서울대학교 금속공학과 공학석사, 1990년 9월 미국 MIT Ph D., 1990년 8월~1992년 1월: 미국 AT&T Bell Lab. PMTS, 1992년 2월~1996년 9월: 서울대학교 무기재료공학과 조교수, 1993년 2월~1995년 2월: 서울대학교 반도체공동연구소 소자제조실장, 1995년 2월~1997년 2월: 서울대학교 반도체공동연구소 공정교육실장, 1996년 10월~2000년 9월: 서울대학교 재료공학부 부교수, 1998년 8월~1999년 7월: Univ. of California, Santa Barbara 방문교수, 2002년 1월~현재: 서울대학교 반도체공동연구소 운영부장, 2002년 10월~현재: 서울대학교 재료공학부 교수, <주관심 분야: 화합물 반도체 에피성장 및 실시간 분석>