

## 나노분석기술 개발

문대원

한국표준과학연구원

### I. 서 론

1999 ITRS에서 가장 도전적인 연구 개발 주제로 선정된 내용 중 나노 분석 기술이 핵심적인 역할을 할 것으로 예상되는 분야를 뽑아보면 MPU CD control, Teq, extension junction depth, MPU barrier thickness for Cu wiring 등을 들 수 있다. 2014년으로 예측되는 35nm technology node에서 요구되는 2nm의 CD control, 0.5nm의 Teq, 1.5nm 3D dopant profile spatial resolution, 0nm barrier 두께 등은 현재 분석가능한 내용이 아니며, 따라서 현재의 기술 수준 한계를 훨씬 넘는 새로운 나노분석 기술이 개발되지 않는 경우 35nm technology node 공정기술의 개발 및 관리는 가능하지 않을 것으로 생각된다. 결국 나노 분석기술의 관점에서 보면 1nm 이하의 형상 측정 기술, 단원자층 분해능의 두께 및 계면 측정, single atom counting 수준의 극미량 초미세 분석기술, 등이 요구된다고 정리할 수 있지만 어느 것 하나 현재 해결 가능할 것으로 예상되는 기술이 개발되어 있는 것은 없다. 대표적인 예로 1.5nm 3D dopant profile spatial resolution의 경우  $1.5^3 \text{nm}^3$ 의 공간 내에 존재하는 총 원자수는 1000개 정도로 이 중에 dopant 원자가 존재할 확율은 거의 없다. 이 경우 요구되는 분석기술의 물리적 의미가 무엇인지 분명하지 않은 지경이다.

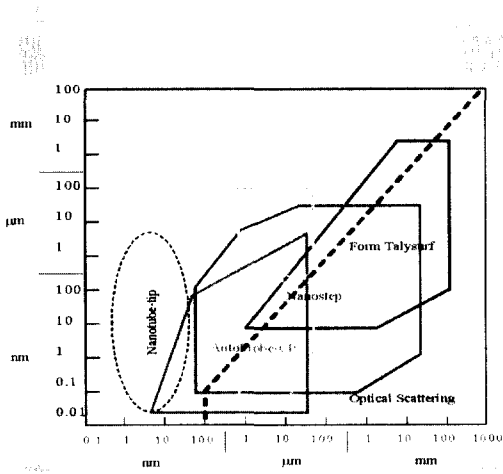
이번 글에서는 현재 연구 개발이 진행 중인 관련 나노 분석 기술 중 이상의 요구를 맞추어낼 수 있을 것으로 예측되거나 적어도 같은 목적을

위하여 활발한 연구가 진행 중인 기술인 SPM 이용 nm 형상 측정 및 표면 원자측정 기술, 이온 빔을 이용한 SIMS/MEIS 기술, 집속전자빔을 이용한 STEM 기술에 대하여 현재의 연구 현황 및 주요 연구 주제에 대하여 정리하고자 한다. 이 글은 표준연의 박병천 박사, 구자용 박사, 이확주 박사의 도움을 받아 이루어졌음을 밝히고, 감사의 말씀을 드립니다.

### II. SPM 응용 나노 측정 기술

#### 1. CNT 응용 나노 형상 측정 기술

1982년 이루어진 scanning tunneling microscope (STM)의 발명으로, 단원자 및 단분자의 가시화가 가능하게 되었고, 이전에 거시세계에서 하듯이 원자수준의 구조도 만들 수 있게 되었다. 이후 1985년 atomic force microscope (AFM)의 발명으로 금속뿐 아니라 유전체까지 영역이 확장되었다. 뿐만 아니라, 공기 및 액체중에서의 관찰 및 작업도 가능하게 되어, 오늘날 나노기술시대의 실용적인 기술로 자리잡아 가고 있다. AFM 등 원자현미경(scanning probe microscope, SPM)은 그 작동원리와 더불어, 예리한 탐침(probe)을 표면에 근접시킴으로써 가능하다. SPM의 공간분해능(수평분해능을 의미함, 수직분해능은 sub-Å)은 탐침의 크기, 모양, 화학적 성질 및 표면상태에 따라 크게 달라진다. 실제로, 오늘날 사용되고 있는 대부분의 SPM 탐침들은 매우 거친 것이다. AFM의 경우, Si 또



〈그림 1〉 surface profilers의 AW mapping

는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>로써 만든 원뿔 또는 피라미트 모양의 tip을 사용하는데, 첨단의 크기는 수 nm, 통상 10nm 이상이며, 첨단부터 15도 이상의 각도로써 커진다. 그러므로, 표면 측정시 tip자체에 의한 convolution 효과는 필연적이다.

현존하는 여러 측정방식의 표면측정기들의 측정영역을 〈그림 1〉에서와 같이 AW mapping으로 도시해 보면 흥미로운 사실을 알 수 있다. 측정방법은 주로 amplitude와 spacing이 모두 큰 영역에서 모두 작은 영역으로의 방향으로 발달해 오고 있다. 반면, 고집적 디바이스의 패턴들은 high aspect ratio의 방향(왼쪽 상단 모서리 방향)으로 발전하고 있다. 또한, STM, AFM 등을 포함한 모든 SPM들은 표면이 원자수준으로 편평할 경우에만 최상의 공간분해능을 보인다. 따라서 고분해능의 high aspect ratio 측정

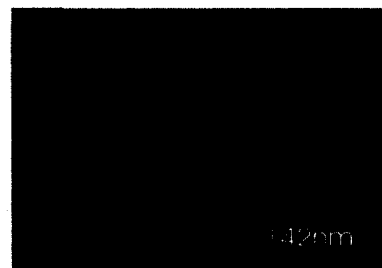
방법이 적극 개발되어야 함을 분명하다. 신뢰성 있는 tip의 부재는 SPM을 이용한 현미경이나 nano-manipulation에 큰 장애가 되어 왔으며, 분자수준에서의 정확한 구조를 가진 재현성 있는 이상적인 tip의 요구가 지속되어 왔다. 최근, multi-walled nanotube(MWNT, 지름 5 nm)를 피라미트 모양의 AFM tip에 붙여 사용함으로써, 최초로 CNT tip의 실례를 보이는데 성공하였다.<sup>[1]</sup> 또한, CNT Tip을 화학적으로 변화시킨 예를 보임으로써, 화학 및 생물학분야에 큰 응용가능성을 제시하였다.<sup>[2]</sup>

Grating의 단면구조 측정시 tip(Ultralever, tip radius<10nm)에 의한 convolution이 심하게 나타나 정확한 측정이 불가능하다. 또한 좁은 간격의 두 structure가 붙었는지 떨어졌는지를 판단한다든가, quantum dot과 같이 tip의 크기보다 작거나 같은 구조물의 크기를 측정하는 등의 일들이 CNT tip과 같은 가늘고 긴 실린더 모양의 tip을 사용한다면, 훨씬 유리할 것이다. 현재 일차적으로 모양이 정확할 뿐 아니라 안정된 CNT tip을 routine하게 만들 수 있는 기술과, 또한 이를 기능화(functionalization)할 수 있는 기술을 개발하여 첨단측정의 예들을 확보하기 위한 연구를 수행 중이며, 계획 중인 중요한 예로는 반도체 집적소자의 sub-100nm CD 측정 및 DNA 구조 측정등을 들 수 있다. 최근 표준연의 주요 연구 결과를 소개하면 다음과 같다.

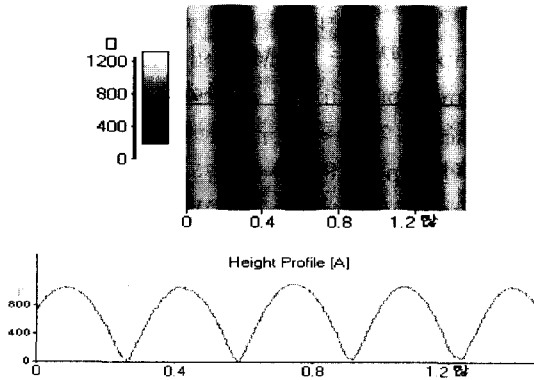
〈그림 2-1〉은 측정이 가능한 tip의 SEM 사진이다. nanotube가 tip의 중앙에 붙어 있지는 않지만 방향이 tip의 끝과 일치하기 때문에 측정이 가능했다. 〈그림 2-2〉는 nanotube의 끝부분이



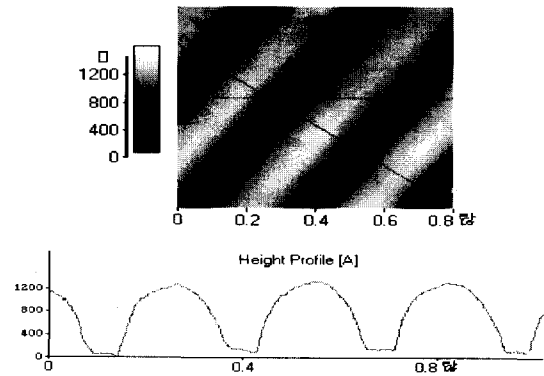
〈그림 2-1〉 Nanotube tip SEM사진



〈그림 2-2〉 nanotube 끝부분 SEM사진



〈그림 3-1〉 conventional tip에 의한 MSX310CE(Moxtek) 측정 결과



〈그림 3-2〉 nanotube tip에 의한 MSX310CE(Moxtek) 측정 결과

다. bundle로 이루어진 MWNT(multi-wall nanotube) 중에 하나의 nanotube만이 뺀어나온 형상으로 실제로 측정이 이루어지는 부분으로 길이는 대략 250nm 정도이고, 직경이 30nm 정도로 보인다. tip의 직경은 해상도와 동일하게 볼 수 있다. 〈그림 2-1〉은 tip의 경사면을 따라서 비스듬하게 붙어 있는 nanotube는 비록 끝이 형태가 좋지만 그 방향으로 인해서 측정에 한계가 생겼다. 따라서 CNT tip으로 측정이 가능하기 위해서는 nanotube의 접착방향과 길이가 중요한 변수로 작용한다.

〈그림 3-1〉과 〈그림 3-2〉는 상용 Si tip (ultralever, PSIA)과 nanotube tip으로 피치가 300nm인 grating을 측정된 결과이다. 〈그림 3-1〉의 경우 5개의 패턴을 측정하였으나 grating의 간격만을 확인할 수 있고, 바닥면까지 tip이 도달하지 못해 정확한 높이를 알 수 없다. 그러나 nanotube tip을 사용한 측정은 grating 사이의 바닥면까지 읽어내고 있다. 따라서 더 정확한 grating의 높이와 형태를 측정할 수 있게 된다.

## 2. STM 응용 표면 원자 측정기술

현재의 STM은 1970년대 후반 IBM의 Zurich 연구소에서 Binnig과 Rohrer 등에 의해 별도로 시작되었다. 그 첫 작품으로 20여년 이상 논란이 되어온 Si(001)-7×7 구조를 관찰

하여 실제 공간에서 원자들의 배열을 깨끗하게 보여주었다<sup>[3]</sup>. STM은 개별 원자들을 실제공간에서 관찰할 수 있을 정도의 분해능을 제공하므로 우선 위치측정 능력이 매우 정밀해야 한다. 이를 위해 STM에서는 tunneling current를 이용한다. 이것은 시료와 탐침의 사이가 1nm 이내로 접근한 상태로 유지될 때 그 사이를 흐르게 되며 거리에 매우 민감해서 아래와 같이 거리의 변화에 지수함수적으로 반비례하게 변화한다.

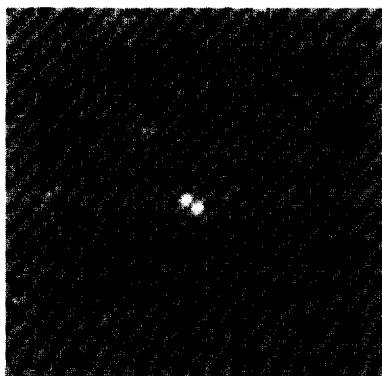
$$I(x) ; \exp(-kx)$$

따라서 이 tunneling current는 시료와 탐침의 거리변화에 매우 민감하게 변화하며 가령 시료와 탐침의 일함수가 4~5eV 수준이라면 대략 0.1nm의 거리변화에 10배 정도의 전류변화를 보이게 된다. 원자분해능을 가지는 STM의 성능은 수직분해능이 0.01nm, 수평분해능이 0.1nm 수준을 쉽게 달성한다. 사용하는 tunneling current는 보통 0.1 lnA 전후이며 외부진동은 0.01nm 이내로 엄격하게 차단되어야 한다. STM의 개발자들에 의해 가장 먼저 해결된 문제는 앞에서 언급한 바와 같이 Si(111)-7×7의 원자구조였으며 그 후에도 초창기에는 주로 표면과 학분야에서 금속이나 반도체 표면의 원자구조를 연구하는데 사용되었다.

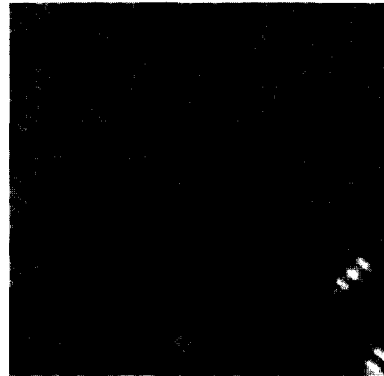
Si와 같은 반도체의 경우 이웃하는 원자들간의 결합은 방향성이 강한 공유결합이므로 특히 표면

에서의 재결합(reconstruction)이 두드러지며 표면의 방향에 따라 다양한 구조가 나타난다. 이에 따라 Si 표면의 전기적 화학적 성질도 다양하게 변하며 실제 소자의 생산을 위해서 만들어야 하는 이중접합을 결함없는 고품질로 만들기 위해서는 처음 이중접합이 생기기 시작하는 아주 초기 상태의 연구가 중요하게 된다. 따라서 가장 처음 깨끗한 표면상태의 원자구조 및 그 위에 다른 이중 물질이 올라갈 때 형성되는 새로운 원자구조 등의 연구에 많은 사람들이 노력을 해 왔다. 또한 기판으로 사용될 깨끗한 표면 위에는 반드시 결함이 생기고 이것은 다시 그 위에 성장되는 물질에 결함을 파급시켜서 최종 생산품의 품질을 떨어뜨린다.

여기에 그 중 간단한 예를 들어본다. Si(001) 면에서 Si 원자들은 <그림 4>와 같이 2×1 구조를 이루며 현실적으로 완벽한 상태는 존재하기 어려우므로 반드시 결함을 포함한다. 그 중 대표적인 것이 dimer vacancy와 step이다. 이들은 특히 본질적인 결함으로 외부의 오염이나 부주의로 생긴 것이 아니므로 언제나 반드시 생기며 이들에 대한 연구는 Si 원자들간의 본질적인 상호작용을 이해하는 데도 매우 유익하다. 한편 이와는 별도로 Si(001) 면이 미량의 Ni나 Cu 등에 의해 오염이 되면 2×n 구조가 형성되는데 이것은 오랫동안 연구되어 왔으나 구조가 정확하게 밝혀지지 않았다. Si(001)-2×n에 대한 정밀한 STM에 의한 측정결과는 <그림 5>와 같은 결과



<그림 4> 깨끗한 Si(001) aus 위의 2×1 구조



<그림 5> 미량의 Ni에 의해 오염된 Si(001)-2×n 구조

를 보여준다. STM의 결과는 3차원의 표면 형상에 관한 결과를 수치로 주므로 이것을 해석하면 원자구조를 도출할 수 있다. 따라서 여기서 새로이 제기되는 문제점은 많은 수의 dimer vacancy들이 가까이 있을 때 이들간의 상호작용이 어떤 것인가 하는 것이다<sup>14)</sup>. 지금까지 설명한 것은 STM의 표면형상측정 능력만을 활용하여 얻을 수 있는 여러 가지 기능을 설명하였으나 이외에도 표면의 국소적인 전자구조(scanning tunneling spectroscopy) 등은 다른 photoemission 실험과의 보완적인 면에서도 매우 유리하며 장래 STM을 이용한 원자제어 기능, 나노가공 등에도 많은 역할을 할 것으로 기대된다.

### III. 이온빔 응용 나노 분석 기술

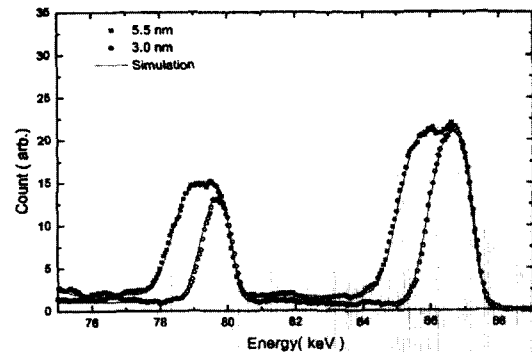
#### 1. 중에너지 이온산란을 이용한 초박막의 표면/계면 원자층 미세분석 기술

초박막 성장에 있어 더욱 더 미세한 원자 단위의 인위적 제어 기술을 요구하며 이에 따른 박막의 표면/계면 분석에도 원자 분해능의 미세 분석 기술이 요구된다. 현재 개발되어 사용중인 박막의 표면/계면 미세 분석 기술 중에서 원자 분해능을 가진 대표적인 분석 기술은 STM과 TEM을 들 수 있다. 그러나 STM은 박막 표면원자에 대한 구조 정보만을 제공하지만 계면에 대한 분

석에 대하여는 사용할 수 없을 뿐 아니라 근본적으로 조성에 대한 분석은 불가능하다. TEM 또한 원자 분해능으로 박막의 원자 구조를 밝힐 수 있는 최선의 기술이지만 시편 제작이 매우 힘들고 또한 전체 시료 중에 극히 일부분만을 관찰하여 박막 전체에 대한 평가로 간주하기에는 힘들다는 점 등 문제가 있다. 이외에도 국내외에서 흔히 사용되는 표면 분석 기술인 XPS, AES, SIMS, RBS 등은 electron mean free path에 따라 정해지는 수 nm의 analyzed depth, sputtering에 의한 시료 파괴 및 ion beam mixing, 검출기의 분해능 등 각 분석 기술이 가지는 본질적인 문제점 때문에 엄격한 의미의 원자층 분해능을 가지기는 힘들다.

MEIS는 원자층 분해능을 가진 RBS라고 할 수 있다. MEIS에서는 RBS에서와 같이 일차이온과 시료원자간의 이차 충돌에 의한 에너지 손실로부터 시료 원자의 질량에 관한 정보를 얻고 100keV의 H<sup>+</sup> 혹은 He<sup>+</sup> 이온이 고체 내부에서 산란되는 과정에서의 전자 에너지 손실을 정밀하게 측정하여 원자층의 깊이 분해능으로 박막의 원소 조성의 깊이 분포를 측정한다. RBS와의 차이점은 MEIS에서 사용되는 100keV의 에너지 영역에서 전자 에너지 손실이 가장 높고 또한 100keV의 이온 에너지를 정전기적 에너지 분석기를 이용하여 매우 정밀하게 측정할 수 있어, MeV 영역의 이온 산란과 에너지 분해능이 10<sup>-2</sup> 정도로 낮은 surface barrier detector를 사용하는 RBS와 구분된다. 또한 이온빔의 channeling/blocking 효과를 이용하여 원자 구조 및 strain 분포에 대한 정보를 단 원자층의 분해능으로 얻을 수 있어 초박막의 표면 및 계면의 조성 및 원자 구조에 대한 극히 유용한 분석기술이다.<sup>[6]</sup> 또한 이온산란 단면적을 쿨롱 포텐셜을 이용하여 정확히 계산할 수 있어 detection efficiency를 단결정 표면 혹은 엄밀히 분석된 초박막 등을 표준시료를 이용하여 교정하면 절대 정량적인 areal atom density를 얻을 수 있다는 것도 매우 중요한 MEIS의 장점이다.

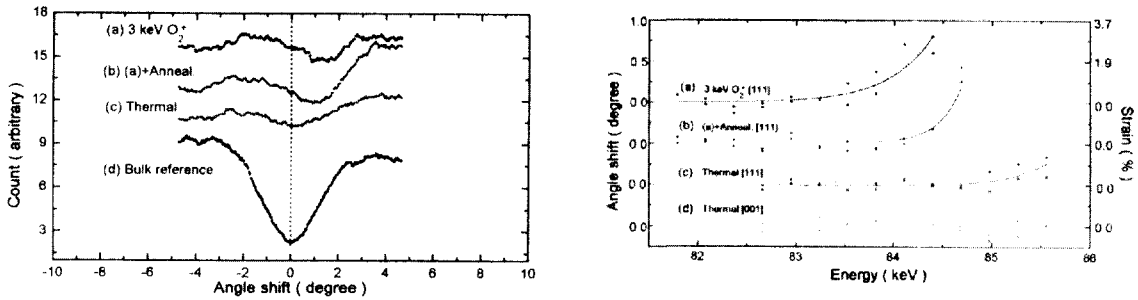
MEIS 주요 응용 결과로 관찰한 Si-SiO<sub>2</sub> 계



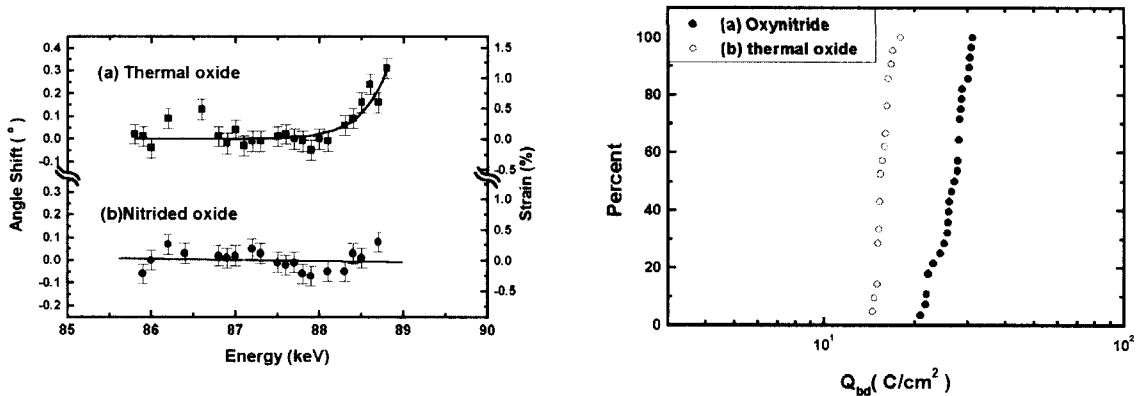
〈그림 6〉 열산화막의 MEIS 에너지 스펙트럼  
(■ : 5.5nm 산화막, ○ : 3.0nm 산화막,  
--- : 모사계산 결과)

면의 구조 분석의 결과를 소개하고자 한다. 초고 집적 반도체소자의 gate oxide로 사용되는 SiO<sub>2</sub>의 두께가 10nm 이하로 얇아지면서 gate oxide막의 절연 특성에 Si-SiO<sub>2</sub> 계면 특성이 중요한 역할을 하면서 그 계면의 조성 및 구조에 대한 정확한 분석의 필요성이 대두하였다. 〈그림 6〉은 게이트 산화막으로 사용되는 5.5nm 열 산화막과 MEIS 분석 장치에 붙은 열처리 통에서 in situ로 산화시킨 3.0nm 열 산화막의 MEIS 에너지스펙트럼과 그것을 모사 계산한 결과이다.

MEIS 각도 분포 스펙트럼을 통하여 전이층에 결정성 실리콘이 존재한다는 것을 보다 명확히 보여줄 수 있는 계면에서의 블로킹 dip의 존재와 그 dip의 위치 변화를 통하여 거친 Si-SiO<sub>2</sub>계면 근방의 결정성 실리콘 원자의 구조 변화, 즉 응력 분포에 대한 측정 결과를 소개하고자 한다. 〈그림 7(a)〉은 열산화막과 이온빔 산화막의 계면에 존재하는 결정성 실리콘의 blocking dip의 변화를 보여준다. (d)는 bulk Si의 blocking dip이며 (a)-(c)는 각각 ion beam oxide, annealed ion beam oxide, thermal oxide 계면의 blocking dip이다. 비정질 SiO<sub>2</sub>층에 접근하면서 결정성 실리콘의 blocking dip의 크기가 감소하는 것은 당연하지만 blocking dip의 위치가 변하는 것을 볼 수 있다. 즉 Si-Si bond angle이 변하는 것을 의미한다. 이는 실리콘이 산화되면서 발생하는 부피 팽창 때문에 남아 있



〈그림 7〉 (a) 열산화막과 이온빔 산화막의 계면에 존재하는 결정성 실리콘의 blocking dip의 변화  
(b) 계면으로부터의 거리에 따른 변형의 분포



〈그림 8〉 Si oxynitride 계면에서의 응력 분포의 변화(a)와 소자 수명 향상 결과(b)

는 실리콘 결정이 compressive stress를 받아 변형되었기 때문이라고 생각한다. 〈그림 7(b)〉은 계면으로부터의 거리에 따른 변형의 분포를 측정하여 나타낸 것이다. 매우 흥미로운 결과는 gate oxide 전기적 특성의 향상을 위하여 반도체 산업체에서 사용하는 방법인 N<sub>2</sub>O 열처리 결과 계면에서 관측되던 strain이 〈그림 8〉과 같이 완전히 없어지는 사실을 발견하고 이 것이 소자 수명의 30% 향상 상관 관계가 있다는 것을 보았다.<sup>[6]</sup>

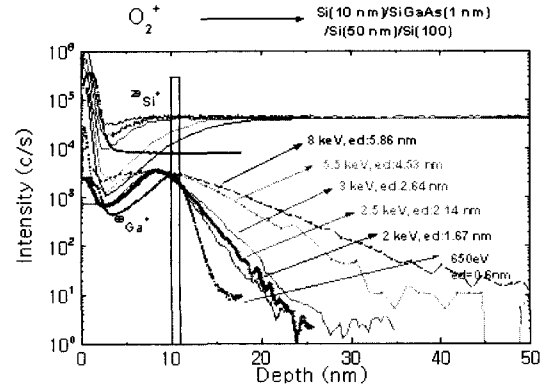
또한 앞으로 실리콘 분야의 새로운 분야인 optoelectronic 응용에 중요한 Ge on Si계의 단결정 성장에 관한 과정 연구 및 H surfactant에 의한 critical thickness 이상의 epilayer 성장 과정 및 strain 분포 측정을 통하여 단결정 초박막의 성장 연구에도 유용하게 활용되었다.

표준연의 MEIS 장치에 UHV-ion beam system을 추가하여 이온빔에 의한 박막 성장 및 에칭 과정에 대한 연구를 in-situ MEIS를 이용하여 연구 중에 있으며 MEIS가 깊이 방향으로 최고의 분해능을 제공하지만 lateral resolution은 거의 없다는 약점을 보충하여 초박막의 나노분석에 대한 궁극적인 분석 능력 확충을 위하여 현재 in-situ STM/AFM 장비를 추가하고 있어 앞으로 점점 나노화 및 초박막화 되어 가는 반도체 및 신소재 박막 연구 및 개발과 관련된 나노구조 및 초박막 성장 과정 및 제어 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대되며 국내의 관련 연구기관의 많은 활용을 바란다.

## 2. Shallow Junction SIMS profiling 10nm 얇은 접합에 관한 주요 기술적인 문제는

접합이 얇아지면서 생기는 저항 문제와 채널이 50nm 정도로 짧아지면서 생기는 문제를 해결하기 위하여 열역학적인 용해도 한계 이상인  $4 \times 10^{20}/\text{cm}^3$  이상으로 불순물을 도핑하고 활성화시키면서 또한 그 활성화된 불순물의 분포를 수nm 이하의 분해능으로 명확히 유지하여야 하는 것을 들 수 있다. 이를 위한 공정 개발 연구가 활발히 진행 중이지만 현재의 반도체 분석 기술로는 10nm 내에 분포하는 불순물의 농도 분포와 활성화 정도를 분석하는 기술은 아직 확립되어 있지 않다. SIMS 분석기술은 많은 문제점을 가지고 있지만 반도체 내의 불순물 정량 및 분포 분석을 할 수 있는 사실상 유일한 방법이기 때문에 지속적인 분석법 개발과 활용이 이루어지고 있다. shallow junction 분석에 대한 ITRS roadmap에 대하여 많은 대안이 제시되고 있지만 0.5nm 깊이 분해능의 dopant 1D profiling은 SIMS가 담당할 것으로 예상되며 ITRS metrology에서 요구하는 1.5nm의 분해능으로 3D dopant profiling은 불가능할 것으로 예상된다.

SIMS측정에 있어서 깊이 분해능은 주로 ion beam mixing, surface roughness development, surface segregation, information depth 등에 의하여 정해진다. 이를 향상시키기 위한 방법은 주로 1keV~100eV의 저에너지 이온을 extreme glancing angle(80~85°)로 입사시켜서 ion beam mixing을 극소화시키는 것이 주로 사용되는 방법이다. 또한 단원자 이온 대신에 polyatomic ion을 사용하여 원자당 ion impact energy를 최소화하고 또한 chemical surface reaction을 활용하여 damageless sputtering도 시도되고 있다. 먼저 이온 에너지의 영향을 살펴보기 위하여 Ga이 delta-doped 된 시료를 사용하여 Ga의 깊이분포도를 구하였다. 시료의 구조는 Si(10nm)/SiGaAs(1nm)/Si(50nm)/Si(100)이다. 일차이온으로  $\text{O}_2^+$ 를 사용하여 impact energy를 변화시켜 입사각의 변화에 따른 깊이분해능의 효과를 연구하였다. <그림 9>에서 에너지는 impact energy이며,



<그림 9> 이온 에너지에 따른 Si(10nm)/SiGaAs(1nm)/Si(50nm)/Si(100)의 Ga SIMS depth profiles

impact 에너지가 감소함에 따라 decay length가 0.6nm까지 감소함을 볼 수 있다.

깊이분해능에 영향을 주는 다른 요인으로 표면 거칠기를 들 수 있다. 일반적으로 금속의 경우 스퍼터링에 의하여 표면 거칠기가 심하게 발달된다. 다행히 실리콘 표면은 수  $\mu\text{m}$ 를 식각하지 않으면 심한 거칠기가 발생하지 않는다. 그러나 깊이 분해능을 향상시키기 위하여 수 백 eV의 저에너지 산소이온빔을 사용하면 수 nm 깊이에서 거칠기가 발생하여 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

이상에서 언급한 SIMS의 깊이분해능 향상을 위한 노력은 한계가 있다. 이온 에너지를 줄이면 깊이분해능은 감소하지만 sputtering rate도 급속히 감소하며 표면거칠기의 문제와 저에너지 이온의 경우 이온빔 특성이 저하되는 경향도 문제이다. 이러한 문제를 실질적으로 해결하기 위하여 delta doped 다층박막 표준시료를 제작하고 이를 이용하여 depth response function을 구하고 이를 이용하여 deconvolution법을 활용하여 original profile을 구하는 연구가 진행 중이다. M. G. Dowsett에 의해 제시된 이 방법은 SIMS에 의한 depth profile은 대부분 지수적으로 감소 또는 증가 하는 Gauss분포를 가지게 되는데 이러한 형태를 수식으로 나타내어 fitting을 하여 각각의 exponential length를 구하는

것이다.<sup>[7]</sup> delta layer의 경우 측정된 SIMS profile 자체가 depth response function이므로 이를 이용하여 SIMS 깊이분해능 평가 및 original profiled fm 구할 수 있다. leading edge는 growth length( $\lambda_g$ )로, transition region은 variance( $\sigma$ )로, trailing edge는 decay length( $\lambda_d$ )의 값을 가지고 깊이 깊이분해능을 평가할 수 있으며 이 방법은 현재 표준연에 의하여 ISO 국제 표준화하는 절차가 진행 중이다.<sup>[8]</sup> 현재 B, Ta, As이 delta층으로 삽입된 다층 실리콘 박막 표준시료를 제작하고 있다.

physical sputtering에 의한 ion beam mixing 효과를 근본적으로 제거하기 위하여 surface chemical reaction을 이용한 atomic layer etching 기술을 개발하여 SIMS에 활용하는 연구가 현재 진행 중이며 shallow junction profiling 과정 중에 SIMS intensity가 정상상태(steady state)에 도달하기 전에 전체 분석의 상당한 부분이 진행되어 이 pre-equilibrium 영역에서의 sputtering yield와 이차이온화 확률의 변화도 shallow junction SIMS profiling법의 확립을 위하여 명확히 이해되어야 할 부분이다.

#### IV. 분석전자현미경을 이용한 나노분석기술

분석전자현미경법(AEM; Analytical Electron Microscopy)의 목적은 가능한 작은 영역의 화학 조성을 정량화 하고 결정구조를 분석함으로써 시료의 미세한 상(Phase)의 물리, 화학 및 전자구조의 정보를 직접 획득하는 데에 있다. 이러한 목표는 STEM(Scanning Transmission Electron Microscope)의 개발과 성능의 개선으로 상당부분 달성되었다. STEM의 전자광학 시스템은 i) 시편에 형성되는 전자빔의 직경을 최소화하여 분석점의 공간분해능이 마이크로 이하로 작아지고, ii) 전자빔의 전류밀도를 극대화시켜서, 탐침이 작아져도 영상이 흐릿

해지는 현상을 극소화 하고 신호의 발생량을 극대화하고 iii) 입사 전자빔과 시료와의 반응으로 발생하는 여러종류의 신호를 효과적으로 수집할 수 있도록 설계되어 있다. 이런 STEM의 장점은 탐침의 크기가 작고 전류밀도가 높은 전자빔을 정보를 획득하려는 위치에 놓을 수 있어서, 미세한 내부조직의 국부적인 화학조성과 결정구조를 정량적으로 분석할 수 있는 기능이다.

최근 상품화된 STEM에는 EDS와 EELS와 CBED 기능이 갖추어져서 그 기능이 CETM이 가지는 미시적인 내부조직을 고해상력의 영상화 기능에 다른 분석기능이 다양하고 고도화 되어서 흔히 분석전자현미경(AEM; Analytical Electron Microscope)으로 불린다. 이러한 전자현미경으로는 박판시료에서 직경이 10~50nm인 크기의 부피에서 화학조성을 5% 이하의 오차범위 내에서 정확하게 분석할 수 있고 작은 부피의 결정구조도 마이크로 전자회절법으로 분석할 수 있다. 현재 세계 최고의 고분해능 Z-contrast 전자현미경은 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에 있으며 가속 전압 300keV, 분해능 0.013nm으로 Si/SiO<sub>2</sub> 계면의 O 조성분포, strain 분포에 대한 측정을 할 수 있다.<sup>[9]</sup>

#### V. 결 론

나노 수준의 소자 및 소재의 제어를 위하여 원자 수준의 나노 분석 기술의 중요성을 점차 높아가고 있다. 나노수준의 반도체 소자 제조 공정이 더욱 까다로워지고 불안정한 공정 제어에 대한 예상 손실이 커짐에 따라 반도체 제조 공정의 개발 및 제어를 위하여 현재 상용되고 있는 단순 공정 관리 및 최적화에 의존하는 방식은 점차 한계를 나타낼 것이다. 이를 위하여 현재의 기술 수준 한계를 훨씬 넘는 새로운 나노분석 기술의 개발이 요구되며, 1nm 이하의 형상 측정 기술, 단원자층 분해능의 두께 및 계면 측정, single atom counting 수준의 극미량 초미세 분석기술



등이 요구된다고 정리할 수 있지만 어느 것 하나 현재 해결 가능할 것으로 예상되는 기술이 개발되어 있는 것은 없다. 이번 글에서는 현재 국내에서 연구 개발이 진행 중인 SPM 이용 nm 형상 측정 및 표면 원자측정 기술, 이온빔을 이용한 SIMS/MEIS 기술과 최신 STEM 기술에 대하여 정리하여 보았다. 연구 개발 중인 나노 분석기술이 반도체 산업 현장에 실질적인 의미를 가질 수 있도록 산학연의 협력의 중요성을 다시 한번 강조하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Hongjie Dai, Jason H. Hafner, Andrew G. Rinzler, Daniel T. Cobert & Richard E. Smalley, *Nature*, 384, 147 (1996)
- [2] Stainslaus S. Wong, Ernesto Joselevich, Adam T. Wooley, Chin Li Cheung, and Charles M. Lieber, *Nature*, 394, 52 (1998)
- [3] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.* 50, 120 (1983).
- [4] J.-Y. Koo, J.-Y. Yi, C. Hwang, D.-H. Kim, S. Lee, and D.-H. Shin, *Phys. Rev. B* 52, 17269 (1995).
- [5] J. F. van der Veen, *Surf. Sci. Rep.* 5, 199 (1985).
- [6] Y. H. Ha, S.-H. Kim, S. Y. Lee, J. H. Kim, D. H. Baek, H. K. Kim and D. W. Moon, *Appl. Phys. Lett.*, 74, 3510 (1999).
- [7] M. G. Dowsett, R. D. Barlow, and P. N. Allen, *J. Vac. Sci. Technol.*, B12, 186 (1994).
- [8] D. W. Moon, J. Y. Won, K. J. Kim, H. J. Kim, H. J. Kang, M. Petracic, *Surf. Interface Analysis*, 29, 362-368 (2000)
- [9] G. Dusche, S. J. Pennycook, N. D. Browning, R. Rupangudi, C. Takoudis, H.-J. Gao, and R. Singh, *Proceedings of 1998 International Conference on Characterization and Metrology for ULSI Technology*, 191, AIP (1998)

#### 저 자 소 개



##### 文大元

1952년 12월 6일생, 1975년 2월 서울대 화학과 학사, 1977년 2월 한국 과학원 화학과 석사, 1984년 2월 미국 펜실베이니아 주립대 화학 박사, 1977년 3월~1980년 8월 : 한국표준연구소 연구원, 1984년 3월~1985년 8월 : 미국 프린스턴대 박사후 연구원, 1985년 9월~1986년 2월 : 미국 국립표준기술표준원 방문연구원, 1986년 3월~현재 : 한국표준과학연구원, <주관심 분야 : 이온빔 응용 표면/계면 분석 기술 (MEIS & SIMS), 이온빔 응용 박막 성장 및 에칭기술>