

# 스텐실마스크를 이용한 다기능 마이크로 /나노 패터닝 기술의 개발

김범준 | 동경대학교

## 1. 서 론

머지않아 100 nm 이하의 구조 사이즈를 갖는 디바이스, 즉 나노 디바이스가 실용화될 것이라는 예측은 산업 여러 분야에서 예견되고 있다. 그러한 나노 디바이스의 개발에서 우선 가장 중요한 핵심기술 중 하나가 나노 패터닝 기술의 개발이라 할 수 있다. 즉 서브마이크로미터의 패터닝 기술이 마이크로 전자회로는 물론, 디지털 기억 장치, 고집적화 마이크로/나노시스템, 바이오/유기재료 디바이스 등에 매우 중요한 핵심 기반 기술이다. 최근까지 나노 패터닝 기술의 개발은 크게 두 방향으로 진행되어 왔다. 하나는 optics 또는 beam을 이용한 lithography 기술로써, photo lithography<sup>[12]</sup>, electron-beam lithography<sup>[34]</sup>, X-ray lithography<sup>[5-7]</sup> 그리고 extreme UV lithography<sup>[89]</sup> 등이 여기에 해당한다. 이러한 lithography 공정은 빛의 조사 여부에 따라 감응하는 화학 물질인 photoresist를 이용하고 Etching 기술을 동반하여 패턴을 형성시킨다. 다른 하나는 SPM(Scanning Probe Microscope)을 이용한 lithography<sup>[10-12]</sup>로써, 최근에는 STM<sup>[13]</sup>과 AFM<sup>[14]</sup>을 이용한 나노 스케일의 lithography 작업과 NSOM<sup>[15]</sup>을 이용한 lithography 작업들이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 기술들은 생산성과 비용면에서 실용화에 많은 문제를 가지고 있다.

1990년대 후반에는 나노 패턴을 형성하기 위한 새로운 기법으로 soft lithography (bottom up approach)가 발표되었는데 이 기법은 마이크로 콘택트 프린팅( $\mu$ CP)<sup>[16]</sup>과 나노 임프린팅 리소그래피(Nano-imprinting lithography)<sup>[17]</sup>등으로 대표되며, 재료의 다양성, 고생산성, 저비용의 master and replication technology에 기초한 새로운 패터닝기술로서 주목을 받고 있다. 특히 물질의 자기조직화(Self-Assembled)를 이용한  $\mu$ CP(micro contact printing)법은 미크론 단위의 패턴을 지닌 PDMS의 스탬프를 이용, 기능성의 SAM(Self-Assembled Monolayer)을 평면상에 국부적으로 패터닝함으로써 직접 원하는 패턴을 얻는 기술로서 나노 패터닝의 형성시 고생산성과 고정밀성을 확보할 수 있는 가능성을 보이고 있음과 동시에 다양한 기능을 지닌 SAM을 이용한다는 응용성 측면에서 마이크로/나노 바이오 디바이스 제작에 큰 기대를 모으고 있다.

한편, 패터닝을 하는 대상과 공정에 따라 위에 언급된 패터닝기술들을 다른 측면에서 고찰할 수 있겠는데, 금속이나 무기물을 패터닝하는 것은 크게 박막을 만드는 공정과 그 박막을 원하는 모양으로 만드는 공정으로 나뉘지고, 이 두가지 공정의 조합으로 이루어진다. 박막을 만드는 기술로는 thermal deposition, sputtering, chemical vapor deposition 등이 일반적이고 그 박막을 패터닝하는 공정으로는 photolithographic patterning, lift-off 등이 있다. 이러한 공정들을 이용해서 최근에는 복잡한 나노패턴도 가능

하게 되었지만 photoresist를 기반으로 하는 공정들은 고온 프로세스, 에칭과 현상을 위한 화학용액때문에 유기물질 또는 생화학물질 등을 패터닝하는데는 적당하지 않은 경우도 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 photoresist를 사용하지 않는 shadow mask 패터닝과 direct patterning 기술들이 사용되고 있다.

지금까지 본인의 연구 그룹에서는 나노 스텐실(nanostencil)을 이용한 나노 패터닝 기법<sup>[18-19]</sup>을 연구하여 왔다. 이 기법은 한번 만들어진 나노스텐실을 이용하여 지속적으로 패터닝을 형성 할 수 있으며 PR이나 etching process를 포함 하지 않으므로 고생산성과 저비용성으로 오염이 없는 나노 구조물을 제작할 수 있다. 또한 다양한 형상의 표면에 패터들을 얻을 수 있으므로 나노 구조물을 포함하는 마이크로 디바이스 등의 제작에 활용할 수 있다.

그외의 direct patterning으로는 inkjet printing, micro spotting, micro contact printing 등이 있지만 고속 다면적 나노 패터닝을 구현하기에는 여러가지 어려움이 있다. Inkjet printing은 직경 10마이크로미터 이하의 물방울로 패터닝을 할 수 없고 패터를 포인트 단위로 하기 때문에 다면적을 패터닝하는 것은 많은 시간을 요구한다. Micro spotting과 micro contact printing은 접촉을 해야 하는 공정이라서 접촉에 민감한 MEMS장치와 호환성이 좋지 않다는 단점이 있다. 또한 위에 열거한 방법들은 원리적으로 wet process라서 그 단점인 패터에 얼룩이 생김과 면이 고르지 않음을 피할 수 없다.

본 연구개발의 과제는 한국기계연구원으로부터의 국제공동위탁연구의 일환으로 동경대학과 일본이화학연구소와의 공동연구수행을 통하여 이루어지고 있으므로 본지를 통하여 간단하게 소개하고자 한다. 본 연구는 direct patterning의 방법중에서 wet process기반이 아닌 dry process로 고속 다면적 마이크로/나노 패터닝을 목표로 새로운 디바이스를 개발하는데 있다. 본 보고서에서는 그 개념과 원리, 개발된 장치, 그리고 실험 결과를 보고한다. 마지막으로 앞으로 과제 추진 방향에 대해 언급한다.

## 2. 고속 다면적 마이크로/나노패터닝 시스템의 개념

본 과제에서 고안한 고속 다면적 마이크로/나노패터닝은 금속 패터닝에서 쓰이는 resistless stencil mask 기술과 유사하다. 금속 패터닝에서의 resistless stencil mask 기술은 금속막을 증착한후 photoresist를 이용해서 패터하고 에칭하는 방법과는 달리 원하는 모양으로 구멍이 난 stencil mask를 기판위에 놓고 바로 thermal evaporation에 의해 증착해서 금속막을 선택적으로 패터하는 방식이다. 그림 1은 금속의 resistless stencil mask 기술의 개념<sup>[19]</sup>을 보여주는 대표적인 예이다. 이와 같은 Silicon Nitride 나노스텐실을 제작하기 위해서는 일반적으로 MEMS 가공기술을 이용하며, 위 경우는 LIL(Laser Interference Lithography)를 통하여 200 nm 이하의 패터를 가지는 나노스텐실 멤브렌을 작성하였다<sup>[18]</sup>. 스텐실마스크를 통한 나노미터스케일의 금(Au) 패터레이의 실례를 그림 2의 SEM사진에 나타낸다.

이 기술은 stencil mask의 구멍의 크기를 나노단위로 만들면 나노패터닝이 가능하고 마스크단위로 패터닝을 하기 때문에 포인트단위로 패터닝을 하는 다른 기술들에 비해 고속으로 단면적을 패터닝할 수 있다는 장점이 있다.

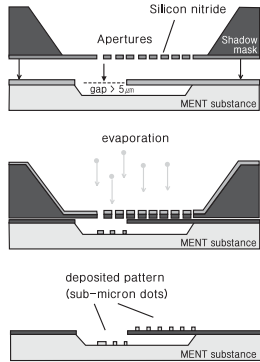


그림 1. 금속의 resistless stencil mask 기술의 개념도 [19]

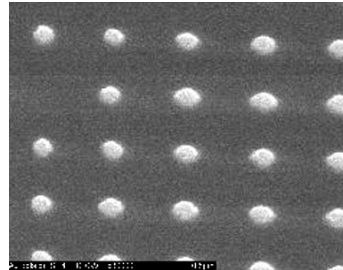


그림 2. 나노스텐실에 의한 나노 패턴

본 과제에서는 이런 stencil mask의 장점을 이용하는 방법을 고안했다. 금속의 stencil mask 기술의 금속 증착에는 thermal evaporation이 사용되는데 그것 대신 본 연구에서는 나노입자가 녹아있는 액체를 작은 입자로 만들어 이것을 stencil mask와 정전기장을 이용해서 기판위에 패터닝하는 기술을 개발했다.

본 시스템은 크게 나누어 atomizer, micro-machined stencil mask, electrostatic field generator로 구성된다. 그 개념은 그림 3으로 설명할 수 있다.

Atomizer는 나노입자를 포함하고 있는 용액을 직경 수 마이크로 미터 단위의 작은 물방울로 만드는 장치를 말한다. 이 장치는 우리 개념에 필수적인 요소이다. 예를들어 잉크젯이나 일반 가습기 처럼 큰 물방울을 만들면 건조하는데에도 시간이 많이 걸리기 때문에 완전히 건조된 입자를 기판위에 고정할 수 없게 된다. 뿐만 아니라 stencil mask가 나노단위의 패턴으로 되어있다고 하여도 건조된 입자가 너무 크면 그 나노 구멍을 통과할 수 없기 때문에 나노단위의 패턴을 할 수 없게 된다. 또한 정전기력을 이용한 고정화방법이므로 atomizer에 의한 미세입자를 형성할때에는 반드시 그 입자가 전하를 갖도록 용액을 대전시켜야 한다. 본 과제에서는 일본의 이화학연구소에서 개발한 electrospray와 surface acoustic atomizer를 atomizer로서 이용했다. 구체적인 설명은 제3장 개발된 장치에서 언급한다.

Atomizer로 만들어진 대전된 입자들은 정전기력에 의해 기판으로 끌려가고 그 중간에 stencil mask가 존재해서 그 구멍을 통해 입자들이 패터닝되는 구조이다. 정전기력으로 유도하기 위해 필요한 것은 electrostatic field generator이고 구체적인 사양에 대해서는 제3장에서 언급한다. 패턴을 위한 stencil mask는 동경대학교 생산기술연구소의 실리콘 MEMS기술을 이용해서 만들었고, 그 가공방법과 치수에 대해서는 제3장에서 언급한다.

Atomizer로 만들어진 대전된 입자들은 정전기력에 의해 기판으로 끌려가고 그 중간에 stencil mask가 존재해서 그 구멍을 통해 입자들이 패터닝되는 구조이다. 정전기력으로 유도하기 위해 필요한 것은 electrostatic field generator이고 구체적인 사양에 대해서는 제3장에서 언급한다. 패턴을 위한 stencil mask는 동경대학교 생산기술연구소의 실리콘 MEMS기술을 이용해서 만들었고, 그 가공방법과 치수에 대해서는 제3장에서 언급한다.

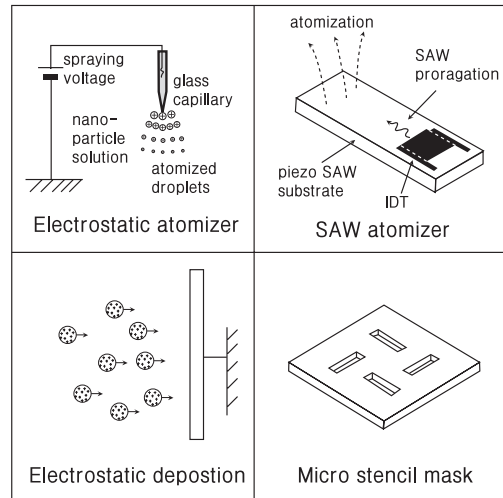


그림 3. 본 시스템에서 사용되는 요소의 구성도

### 3. 본 연구의 나노 패턴의 시스템

#### 3.1. Electrostatic Atomizer

##### 3.1.1 개요

Electrostatic atomizing는 가는 모세관속에 용액을 주입하고 타켓기관 사이에 수십 kV 이상의 고전압에 의한 정전기력으로 미세방울을 분사하는 기술로서 1950년대부터 물리학실험 등에 많이 사용되었고 최근에는 질량분석기의 ionizer로 널리 사용되고 있다.<sup>[20]</sup>

##### 3.1.2 원리

Electrostatic atomizing은 그림 4에서 보여지듯 용액을 넣은 모세관과 그것과 대응하는 기관전극과 고전압전원으로 구성된다. 고전압이 모세관에 인가되면 전기장 집중효과에 의해 모세관 끝에 극도로 큰 전기장이 발생한다. 이때 모세관 끝에 발생하는 전기장의 세기  $E_c$ 는 다음의 식으로 계산할 수 있다.<sup>[20]</sup>

$$E_c = \frac{2V_c}{r_c \ln(4d/r_c)}$$

여기에서  $V_c$ :고전압,  $r_c$ :모세관 끝의 외경,  $d$ :모세관과 대응전극간의 간격이다 여기에  $V_c=2000V$ ,  $r_c=10^{-4}m$ ,  $d=0.02m$ 라고 한다면  $E_c \sim 6 \times 10^6 V/m$ 이 된다. 전기장 집중의 세기는 고전압이 클수록, 모세관 끝의 외경이 작을수록 커진다.

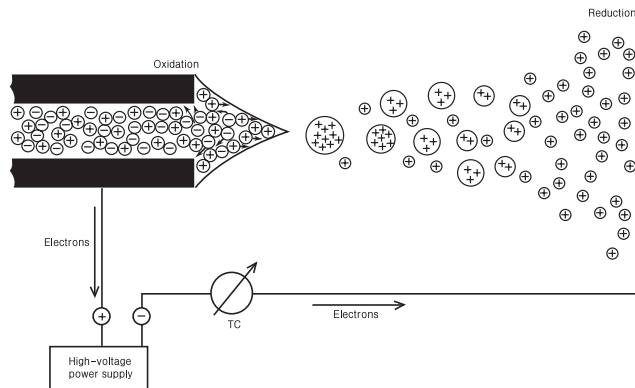


그림 4. Electrostatic atomizing의 구성<sup>[20]</sup>

이렇게 집중 형성된 전기장은 용액이 들어있는 모세관 내부를 관통하게 되어 모세관 끝부분의 용액표면에는 전기이중층이 형성된다. 이중 정전하를 가지는 이온이 표면에 집중되어 표면이 불안정해지는 결과 콘이나 제트의 형태로 미세방울이 분사된다. 이때 분사된 미세방울은 전기장에 의해 유도되고 그 과정에 용매가 증발하여 축소 분할된다. 이 과정에서 극도로 작아진 입자로부터 이온이 발생되어 질량분석기 등의 검출기에 이용되고 있다. 본 과제에서는 질량분석계 등에 사용되는 electrospray ionizer와 달리

이온화되지 않은 입자를 기판에 원하는 패턴으로 수집하는 electro spray deposition 기술을 이용한다.

### 3.2 Electro spray Deposition (ESD)

#### 3.2.1 개요

그림 5는 ESD의 구성도이다. 본 장치는 아크릴로 만든 챔버안에 모세관 고정장치, 유도링, 유도망사, 테프론시트, 샘플기판 등이 장치되어 있다. 모세관에 집중된 전기장에 의해 불안정해진 용액은 미세방울이 되어 나오고 그것을 정전기력으로 stencil mask의 구멍을 통해서 수집 패턴닝하는 방법이다.

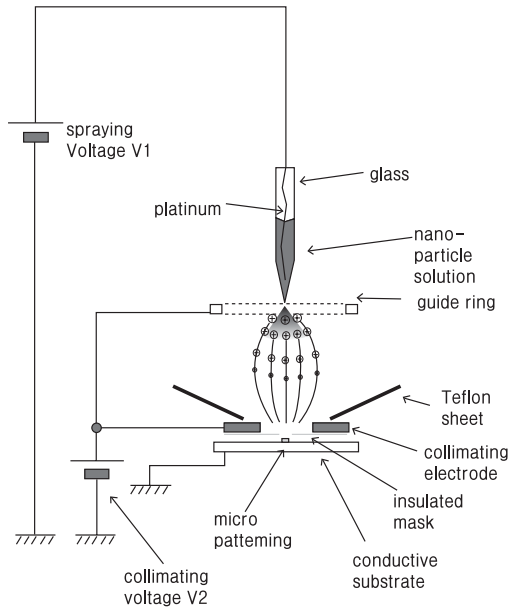


그림 5. Electro spray Deposition의 구성도

#### 3.2.2 개발된 장치

그림 6은 일본의 이화학연구소에서 개발한 ESD의 실제 사진이다. ESD에 의한 미세방울은 너무나 작아서 육안으로 직접 관찰하는 것은 곤란하다. 그래서 고안한 방법이 레이저와 카메라를 이용한 가사화이다. 왼쪽에 있는 레이저로 모세관 끝의 바로 밑을 주사하면 분사되고 있는 미세방울들이 그 레이저를 산란시키고 그것을 오른쪽의 카메라로 관찰할 수 있다.

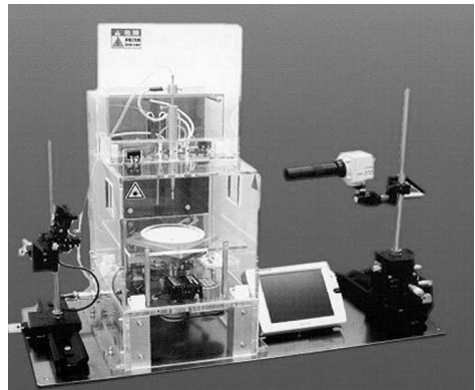


그림 6. 개발된 ESD장치의 본체

### 3.3 Surface Acoustic Wave Atomizer

#### 3.3.1 개요

Surface acoustic wave (SAW)는 기판의 깊이에 따라 기하급수적으로 진폭이 작아지는 탄성표면위에서의 Rayleigh wave를 말한다. SAW디바이스는 주로 필터나 레이더신호처리 부품 등 주로 전기적 부품으로 많이 쓰이는데 최근에는 기계적 모터, 자이로스코프, 촉감디스플레이 등 기계적 부품으로도 사용되고 있다. SAW로 야기된 기계적 진동에 의해 표면의 용액을 미세방울화시키는 것이 가능하고 이것을 SAW atomizer라 한다.<sup>[21]</sup>

### 3.3.2 원리

Rayleigh wave는 액체와 접촉면에서 capillary wave가 되고 그 진동에 의해 미세방울을 생성할 수 있다. 이 capillary wave의 큰 진폭은 용액표면에 파도를 만들고 더 큰 진폭과 속도가 주어지면 표면은 견디지 못하고 미세방울이 되어 공기중에 분사된다. SAW atomizer에 사용되는 압전재료는 PZT가 아닌 lithium niobate인데 그 이유는 lithium niobate가 PZT보다 최대 입자진동 속도가 훨씬 크기 때문이다. 입자진동속도가 커서 일반적으로는 미세방울을 형성할 수 없는 SAW 디바이스가 atomizer로 사용될 수 있다.

### 3.4 Surface Acoustic Wave Atomizer and Electrostatic Deposition (SAW-ED)

ESD는 본 과제수행에 있어서 효과적인 방법임에 틀림없으나 점성이나 전기전도성이 높은 액체는 미세방울화하는 것이 어렵다. 그런 문제점을 극복하기 위해 기계적인 진동에 의해 미세방울을 만드는 SAW-ED를 개발하게 되었다. SAW-ED는 SAW atomizer에 의해 만들어진 미세방울을 정전기력을 이용해서 수집 패턴닝하는 기술이다. 일반 초음파보다 고주파수를 사용하기 때문에 보다 작은 미세방울을 생성할 수 있다. 그 개념도를 그림 7에 표시한다.

압전기판위의 용액은 고전압에 의해 대전되고 그후 RF power에 의해 진동이 일어나 그 진동에 의해 대전된 미세방울이 공기중을 날아간다. 이 미세방울은 전기장에 의해 대응하는 기판전극으로 유도되면서 stencil mask에 의해 패턴닝이 된다.

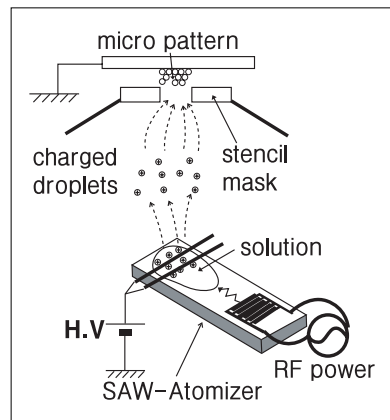


그림 7. SAW-ED의 개념도

### 3.5 Micromachined Stencil Mask

대량 생산된 얇은 커버유리를 abrasive jetting에 의해 비전도성 유리 stencil mask를 만들 수 있다. 이 방법으로는 100 μm 이하의 분해능을 만드는 것이 대단히 어려운 일이다. 실리콘 MEMS 기술을 이용해서 고분해능 stencil mask를 만들 수 있다. 그림 8은 실리콘 MEMS 기술을 이용한 stencil mask의 제작공정을 나타낸다.

첫번째 SiN 박막을 LPCVD로 증착한다. 박막의 두께는 약

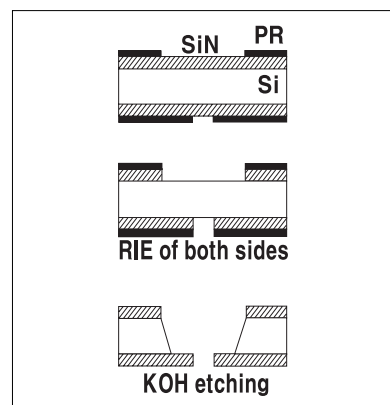


그림 8. 실리콘 MEMS공정을 이용한 stencil mask 제작 공정

170 nm이다. 둘째 positive photoresist를 UV와 photomask를 이용해서 양면을 패터닝한다. 위쪽면은 SiN membrane을 만들기 위한 패터닝이고 밑면은 완성된 stencil mask에서 aperture가 되는 패터닝이다. 세번째, SiN을 패터닝된 photoresist와 RIE를 이용해서 에칭한다. 네번째, 30퍼센트 KOH용액으로 실리콘을 에칭한다. 이때 패터닝된 SiN은 원하지 않는 부분이 에칭되지 않도록 보호하는 역할도 한다. SiN membrane과 aperture만 남아서 stencil mask가 된 모습을 그림 9에 나타낸다.

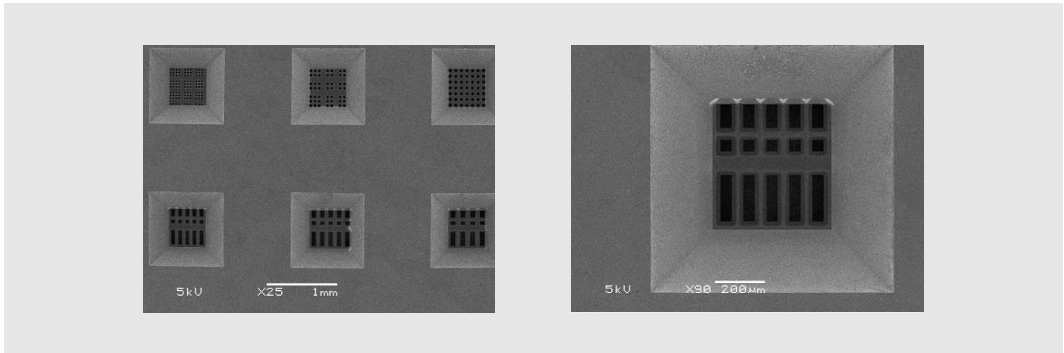


그림 9. 실리콘 MEMS공정을 이용한 stencil mask의 SEM사진

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 ESD와 micro stencil mask를 이용한 패턴

이번 실험에서는 직경 50nm의 amine-modified fluorescent latex beads (Sigma) 0.1% 용액을 사용해서 그 성능을 테스트해 보았다. 기관으로는 aldehyde-modified ITO glass를 이용했는데 그것은 amine-modified nanoparticles를 화학적으로 기관위에 고정하기 위한 것이다. 마이크로 패턴은 535 nm 형광현미경으로 관찰했다.

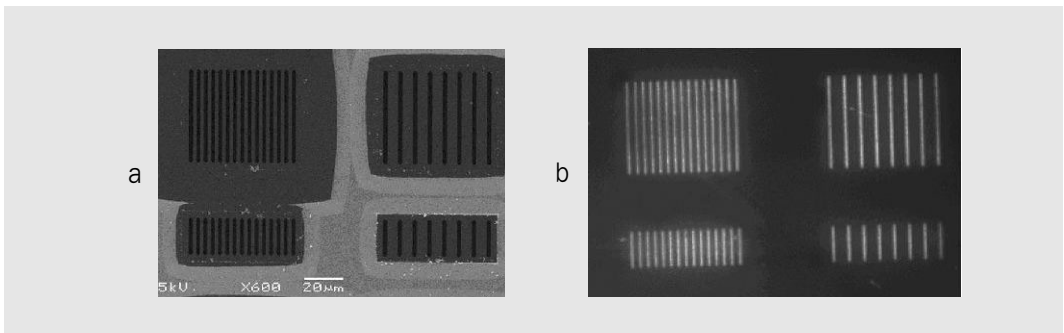


그림 10. 분해능이 가장 높은 마스크와 그것을 이용한 패턴  
(a: stencil mask를 이용한 패턴, b: 고분해능 stencil mask)

이번 실험에서는 본 과제의 분해능을 검증하기 위해서 다양한 사이즈의 긴 구멍의 stencil mask를 만들어서 실험했다. 가장 작은 것이 2 µm의 긴 구멍과 4 µm의 pitch로 된 패턴이었다. 형광현미경에 의해 가

장 분해능이 높은 이 패턴이 성공적으로 관찰되었고 그 사진을 그림 10에 나타낸다. 이번 실험에서의 분해능의 한계는 본 과제의 근본적인 한계가 아닌 stencil mask를 일반공정으로 만들 수 있는 한계이므로 진정한 의미의 한계는 지금은 아직 알 수 없다.

상대적으로 큰 구멍의 stencil mask를 이용한 경우는 구멍보다 작은 패턴을 관찰할 수 있었다. 이것은 비전도성의 SiN이 유도된 입자에 의해 대전되어 전기장이 바뀌었기 때문이다. 이 원리는 비전도성의 stencil mask를 이용하면 효율을 높여서 패턴을 할 수 있다는 것을 암시해주고 더 나아가 조건에 따라서는 구멍보다 작은 패턴도 가능하다는 것을 의미하는 중요한 실험결과이다.

#### 4.2 ESD와 SAW-ED의 미세구조 비교

본 과제의 실험에서는 주로 ESD를 이용해서 실험을 했다. 그러나 ESD로 불가능한 물질을 패턴닝할때에는 SAW-ED가 필요해지고 ESD와 SAW-ED의 성능을 비교할 필요가 있다. 이번에는 ESD로 만들어진 패턴의 미세구조와 SAW-ED로 만들어진 미세구조를 FE-SEM을 이용해서 고배율 사진으로 비교해보았다. 그림11에서 알 수 있듯 클러스터의 사이즈는 약 100 nm에서 200 nm로 두 방식으로 만든 미세구조는 별로 차이가 없어 보인다. 그림 11에서 50 nm의 많은 나노입자들이 하나의 클러스터를 만들고 있음을 알 수 있다. 이 결과로 판단해 본다면 SAW-ED도 ESD와 동등한 정도의 미세방울을 생성하고 있고 거의 같은 분해능의 패턴이 가능하리라고 생각된다. 미세구조사진에서 보면 클러스터가 약 100 nm에서 200 nm 사이이므로 stencil mask를 나노 분해능으로 만든다면 나노패턴이 가능할 것이라는 것을 입증하고 있다.

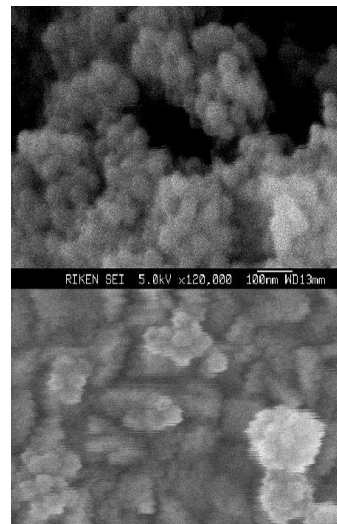


그림 11. ESD만든 패턴과 SAW-ED로 형성된 패턴의 미세구조 비교 (위: ESD로 형성된 패턴, 아래: SAW-ED로 형성된 패턴)

### 5. 결 론

나노 패터닝(nano patterning) 기술은 초고용량 반도체 및 미소 반도체 패키지, 마이크로 & 나노 디바이스, MEMS/NEMS 등을 실용화 할 수 있는 핵심 기반 기술이며, 그 응용 분야는 기계, 전자, 정보, 의약, 방위 산업 등과 같이 다양하다고 할 수 있다. 이러한 나노 패터닝 기술의 핵심은 나노 스케일의 구조나 시스템을 저비용, 고생산성, 혹은 고정밀도를 갖고 제조하는 기술이라고 할 수 있다. 이와 같은 관점으로 지금까지의 나노 패터닝 기술들을 재고해 보면, photo lithography의 경우 고생산성의 실현이 가능하며 장비의 안정성 및 가격 등의 면에서 우월하나 100nm 이하의 미세 선폭을 제작하는 것에 어려움이 있으며, electron-beam, X-ray 그리고 extreme UV lithography는 선폭의 제한을 상당히 줄일 수 있으나 고가의 장비를 활용하여야 하고, 안정적인 생산성을 얻기 위해 해결해야할 과제들이 아직 많이 남아있다. 또한 SPM을 이용한 lithography는 고정밀도를 확보할 수 있으나 생산성 측면에서 불리하다.



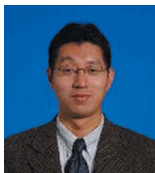
본 연구개발을 통해 나노 패턴의 제작 시 고생산성, 저비용성 및 적용 표면의 다양성 등의 많은 장점을 확보하고 있는 나노스텐실을 이용한 나노 패터닝 기법을 습득하고, 그위에 새로운 기법의 ESD와 SAW-ED를 나노입자의 패터닝하는 기술로서 도입을 하고 그 특성을 실험해 보았다. Micro stencil mask 는 실리콘 MEMS 기술로 구현했으며 SiN membrane에 aperture가 가공되어있는 형상이고 실험을 통해서 stencil mask가 비전도성이고 효율과 분해능을 높힐 가능성이 있음을 증명했다. 또한, 마이크로 미터 분해능의 패턴을 성공적으로 만들었고 클러스터의 사이즈로 보아 나노 분해능의 패턴도 가능하리라는 것을 증명했다. 이번 실험은 형광 나노입자의 패턴이었지만 이 방법은 원리적으로 금속 나노입자와 같은 다른 응용분야가 많다.

본 연구의 기대효과는 새로운 나노패터닝 기술의 확보, 신뢰성 있는 마이크로 구조물에 대한 설계 기술 확보 그리고 구조적으로 안정적인 나노 구조물 형성을 위한 기반 기술 확보에 있다. 그 활용 방향은 마이크로 & 나노 기구, MEMS/NEMS, bio-MEMS 등을 들 수 있으며, 보다 실질적으로는 초고용량 반도체 제작 및 미소 반도체 패키지 제작 기술에 직접적으로 적용할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] S.M. Huang, L.M. Dai, and A.W.H. Mau, "Controlled fabrication of large-scale aligned carbon nanofiber/nanotube patterns by photolithography", *Advanced Materials*, V. 14 N. 16, 1140-1143, 2002
- [2] K. FUKUSHIMA, R. SASAJIMA, K. FUJIMARU, and H. MATSUMURA, "A Novel Nanoscale Metal Transistor Fabricated by Conventional Photolithography", *Japanese Journal of Applied Physics Part 1- Regular Papers Short Notes & Review Papers*, V. 38, N. 12B, 7233-7236, 2000
- [3] P.A. Peterson, Z. J. Radzinski, S.A. Schwalm, and P.E. Russell, "Low-voltage electron beam lithography", *J. Vac. Sci. Technol.*, B10, 3088-3093, 1992
- [4] M.L. Grilli, D. Ristau, M. Dieckmann, U. Willamowski, "Thermal conductivity of e-beam coatings", *Appl. Phys. A : Materials Science & Processing*, 71(1), 71-76, 2000
- [5] M. Khan, G. Han, S.B. Bollepalli, and F. Cernina, "Extension of x-ray lithography to 50nm with harder spectrum", *J. Vac. Sci. Technol.*, B17, 3426-3432, 1999
- [6] T. Kitayama, K. Itoga, Y. Watanabe, and S. Uzawa, "Proposal for a 50nm proximity x-ray lithography system and extension to 35nm by resist material selection", *J. Vac. Sci. Technol.*, B18, 2950-2954, 2000
- [7] L. Yang and J.W. Taylor, "Study of x-ray phase-shifting masks for sub-70nm patterning", *J. Vac. Sci. Technol.*, B19, 129-135, 2000
- [8] Service RF., "EUV lithography - Optical lithography goes to extremes - And beyond", *Science*, V. 293, N. 5531, pp785-786, 2001
- [9] A.M. Hawryluk, N. M. Ceglio, and D.A. Markle, "EUV Lithography", *Solid State Technology*, V.40 N.7, 1997
- [10] E.S. Snow, D. Park, and P.M. Campbell, "Single atom point contact devices fabricated with an atomic force

- microscope”, Appl. Phys. Lett., 69(2), 269-271, 1996
- [11] C. F. Quate, “Scanning probes as a lithography tool for nanostructures”, Surface Science, 386(1-3), 259-264, 1997
- [12] F.S. Chien, C.L. Wu, Y.C. Chou, T.T. Chen, S. Gwo, and W.F. Hsieh, “nanomachining of (110)-oriented silicon by scanning probe lithography and anisotropic wet etching”, Appl. Phys. Lett., 75(16), 1-3, 2000
- [13] U. Kleineberg, A. Brechling, M. Sundermann, and U. Heinzmann, “STM lithography in an organic self-assembled monolayer”, Advanced Materials, V. 11, N. 3, 208-212, 2001
- [14] S.M. Kim, S.J. Ahn, H. Lee, and E. Kim, “Study of positive charge effect on AFM anodization lithography using metal phosphate monolayers”, Ultramicroscopy, V. 91, N. 1-4, 165-169, 2002
- [15] S.C. Lo and H.N. Wang, “Near-field photolithography by a fiber probe Nanotechnology”, IEEE-NANO 2001, Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on, 36 -39, 2001
- [16] Y. Xia and G.M. Whitesides, “Soft lithography”, Annu. Rev. Mater. Sci., 28, 153-184, 1998.
- [17] S.Y. Chou, P.R. Krauss, P.J. Renstrom, Appl. Phys. Lett., 1995, 67, 3114
- [18] J. Brugger, J.W. Berenschot, S. Kuiper, W. Nijdam, B. Otter, and M. Elwenspoek, “Resistless patterning of sub-micron structures by evaporation through nanostencils”, Microelectronic engineering, 53, 403-405, 2000
- [19] B. Kim, B. Otter, J. Sanderink, M. Smithers and J. Brugger, “ “Dry lift-off” patterning on fragile surfaces using MEMS shadow masks”, Eurosensors XIV, the 14th. European conf. on Solid-State Transducers, Denmark, 619-621, 2000
- [20] Richard B. Cole, “Electrospray Ionization Mass Spectroscopy”, Wiley-Interscience, 1997
- [21] M. Kurosawa, T. Watanabe, A. Futami, and T. Higuchi, “Surface Acoustic Wave Atomizer”, Sensors and Actuator A50, pp. 69-74, 1995



김 범 준

- 동경대학교 생산기술연구소 교수
- 관심분야 : 마이크로/나노 기구, MEMS/NEMS, Bio-MEMS
- E-mail : bjeonkim@iis.u-tokyo.ac.jp