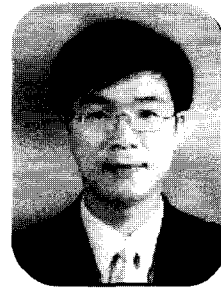




# 나노선 연구에 있어서의 전자빔 식각기술의 응용



김강현  
고려대  
전기공학과 박사과정



김규태  
고려대  
전기공학과 교수

## 1. 서론

1948년 J. Bardeen 등에 의해 발명된 게르마늄 트랜지스터 이래로 반도체 공업은 숨 가쁘게 발전하여 현재는  $0.1\mu\text{m}$  수준의 크기를 지나  $0.01\mu\text{m}$  수준의 트랜지스터까지도 시연되고 있다[1,2]. 집적회로의 발전에는 대면적의 식각기술의 뒷받침과 끊임 없는 소재의 개발이 그 밑바탕이 되고 있어 앞으로의 발전에 있어서도 패터닝 기술과 소재 기술은 다음 세대에도 반도체 산업발전의 원동력이 될 것임을 짐작해 볼 수 있다. 소재의 발전으로 높은 운동도 (mobility)를 가지는 화합물 반도체를 비롯해서 강유전체 등의 실리콘 공정에서의 이식 등 끊임없는 기술개발이 이루어져 왔고 최근에는 나노 스케일의 나노합성물도 등장하고 있다[3,4]. 1991년 S. Iijima에 의해 발견된 탄소나노튜브는 아름다운 기하학적인 대칭성, 저차원 전도체 등의 특별한 물성으로 인해 1985년 노벨상 수상물질이었던  $C_{60}$  계열과는 다른 화제를 불러 일으켰고 이에 물리적, 화학적인 순수 학문적인 관심을 끌기에 충분했다 [5,6]. 이와 더불어 70년대 제안된 분자 자체로 이루어진 전자소자에 대한 기술적 검증법의 필요성에 맞추어 1994년 J. P. Issi에 의해 주사터널링 현미경 (STM)에서의 이미징 기술과 전자빔 식각에 따른 선택적 패

터닝 기술을 결합하여 한 개의 탄소나노튜브에만 전극을 형성할 수 있는 기술적 토대가 마련되었다[7,8]. 이후 1996년 T.W. Ebbesen 팀에 의해 Focused Ion Beam 기술로 하나의 탄소나노튜브를 이미징하면서 패터닝을 동시에 함으로써 한 개의 나노선에 대한 다양한 전기적 특성에 관해서 보고를 하게 되었고 1997년 C. Dekker에 의해서는 탄소나노튜브 한개가 양자소자로서 작동을 하여 단일전자트랜지스터, 공진터널링다이오드 등의 1nm에 불과한 직경에서 유래되는 양자소자 특성까지 관측하였다 [9,10]. CAD (Computer Aided Design)에 의한 전체적인 밑그림을 기반으로 패턴을 중첩시켜나감으로써 실리콘소자를 만드는 탑-다운(top-down) 방식의 한계가  $\sim 10\text{nm}$  정도까지 시연되고 있는 것을 본다면 단위체를 조립시켜 큰 그림의 소자를 만드는 바텀업 (bottom-up) 방식에서의 나노선 연구는  $1\text{nm}\sim 10\text{nm}$  사이의 기술에서만 장차 기술적 학문적으로 큰 의미가 있는 것으로 여겨진다. 따라서 수 nm 혹은 수 Å 스케일의 분자에서는 나노미터 스케일의 패터닝을 선택적 혹은 임의로 할 수 있는 기술이 필요하며 그에 대한 방법으로 전자빔 식각기술, 원자현미경 식각기술 등이 있고 이전 실리콘 기술과의 연속성을 고려해 볼 때에도 전자빔 식각기술은 바텀-업 방식의 나노소자연구에 있어서 필

수불가결한 요소로 여겨진다. 1997년 이후 원자현미경 이미지와 전자빔 식각기술을 결합한 패터닝 방법은 나노선 혹은 분자의 전기적 특성 등을 연구하는데 있어서 기본으로 쓰이고 있으며 그 대표적인 그룹으로 미국 하버드의 C. M. Lieber 그룹, 네덜란드 C. Dekker 그룹, 코넬의 P. L. McEuen 등의 그룹 등이 나노선 소자연구에 전자빔 식각기술을 이용하고 있고 한국에서는 표준과학연구원, 전북대, 서울대, 연세대, 고려대 등지에서 패터닝 도구로서 많이 쓰이는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 바텀-업 방식의 대표적인 대상체 중 하나인 나노선에 선택적 패터닝 하는 전자빔 식각기술의 방법을 소개한다.

## 2. 전체 작업순서

나노선과 같은 바텀업 방식에서의 나노구조체에 대해 선택적인 패터닝을 하기 위해서는 그림 1과 같이 나노선 이미지를 얻은 후 위치를 파악하여 전자빔 식각장치로 설계된 디자인을 보내어 바로 전자빔을 조사하는 작업으로 선택적인 패터닝을 형성하게 된다. 선택적인 패터닝이 아닌 패터닝된 전극 위에 나노구조체를 올리는 것이 아니라면 그림 1에서 도식화한 순서대로 위치결정 및 패터닝을 하게 되며 이때 전체적인 분해능과 재연성은 현미경에서 얻은 이미지의 질에 달려있다고 할 것이다.

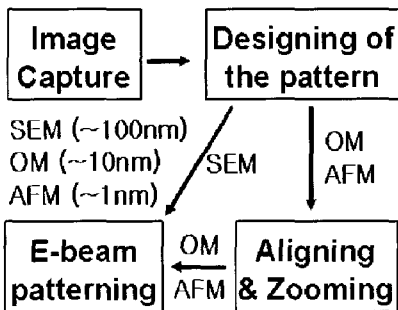


그림 1. 나노선에 선택적인 패터닝을 하는 순서. OM(Optical Microscope), SEM(Scanning Electron Microscope), AFM (Atomic Force Microscope).

이미지를 얻는 작업에서 한가지 더 고려해야 할 것은 이미지를 통해 나노구조체에 전기적 특성에 변화를 줄 수 있는지 여부를 확인하는 것이다. 실제로 SEM (Scanning Electron Microscope) 작업을 나노구조체에 직접 했을 때 전자빔에 의해 무결정 탄소막이 구조체에 입혀지게 된다는 연구보고가 있다[11]. 그림 2는 T. Djenizian et al에 의해 보고된 탄소패턴을 후속 공정을 통해 마스크로 쓸 수 있다는 연구결과로 전자빔을 수초에서 수십 초까지 노출시켜 갔을 때 노출된 곳에 탄소패턴이 형성된 결과를 보여준다. 나노선 연구에 있어서 큰 영향을 주지 않을 수도 있지만 나노구조가 양자전자구조와 밀접한 연관이 있다는 것을 가정한다면 나노구조에 선택적인 패터닝을 할 때 되도록 전자빔에 노출시키지 않는 노력이 있어야 함을 짐작할 수 있다. 이에 따라 전자현미경을 통한 위치파악에는 PMMA (Polymethylmethacrylate) 막을 입힌 상태에서 나노구조체의 위치를 파악하는 방법을 취하게 된다[12]. 나노선 주위의 PMMA가 둘러싸으로써 절연체가 있게 되어 실제 전자현미경으로 이미지를 취할 때에는 분해능이 100nm 정도로 많이 떨어지게 되지만 전자소자로서 특성조사를 고려해 본다면 PMMA로 나노선을 보호하는 것이 좀 더 합리적인 것으로 여겨진다.

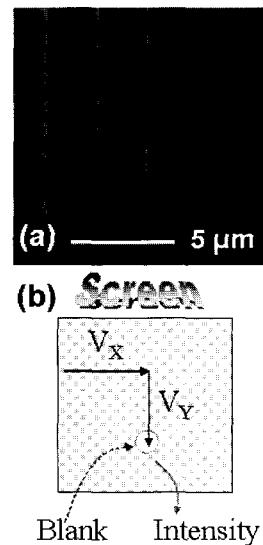


그림 2. (a) 전자빔 조사만으로 형성된 탄소패턴 (b) 전자빔 패터닝방법 원리.



그림 2의 (b)는 전자빔 식각기술에 있어서 패턴을 따라 전자빔을 노출시킬 때 빔위치를 결정하는 두개의 전압  $V_x$ 와  $V_y$ 로 특정영역에 전자빔을 위치시키는 것을 보여주며 Blank 신호를 통해 빔을 보낼 것인지의 여부로 단속을 하고 반사되는 전자빔을 Intensity 포트를 통해 읽어 들임으로써 국소적으로 이미지도 얻을 수 있게 한다. 이때 Blank 시키는 시간에 따라 전자빔에 노출되는 시간을 결정하게 되며 패턴에 쏘여주는 전하량 (Dose)을 조절할 수 있게 된다. Aligning & Zooming 과정에서 이미 설계된 CAD 패턴에 따라 하드웨어적으로 전자빔을 조절할 때에는  $V_x, V_y$ , Blank 세 신호를 제어하고 Intensity를 통해 들어오는 시료의 이미지를 통해 필요할 때 Align 해 줌으로써 전자빔 식각과정이 진행되게 된다[13].

### 3. 나노선 이미징

나노선의 직경은 대략 1~100nm, 길이는 1~100 $\mu$ m 정도로 aspect ratio가 1000에 이르러 길이의 정도에

따라 원자현미경, 전자현미경, 광학현미경으로 관측하여 이미지화 하게 된다. 그림 3은 각종 나노선을 크기에 따라 선택한 현미경에서 얻은 이미지로 일반적인 예상과는 달리 폭이 30nm 정도 되더라도 광학현미경에서 구별할 수 있을 정도의 이미지를 얻을 수 있다. 30nm 크기 정도의 입자의 경우에는 구별하기 어렵지만 길이가 긴 나노선의 특성에서 기인하여 폭이 30nm 정도는 관측이 됨을 어렵지 않게 확인할 수 있었다.

표 1에서는 현미경 종류에 따른 분해 가능한 나노선의 직경을 실험상 나타난 결과를 바탕으로 정리한 것이다.

표 1. 현미경에 따른 분해 가능한 나노선 직경.

현미경 종류	PMMA 코팅한 기판을 관측하는 전자 현미경	광학현미경 ( $\times 1,000$ )	원자현미경
나노선 직경분해능	~100nm	~30nm	~1nm

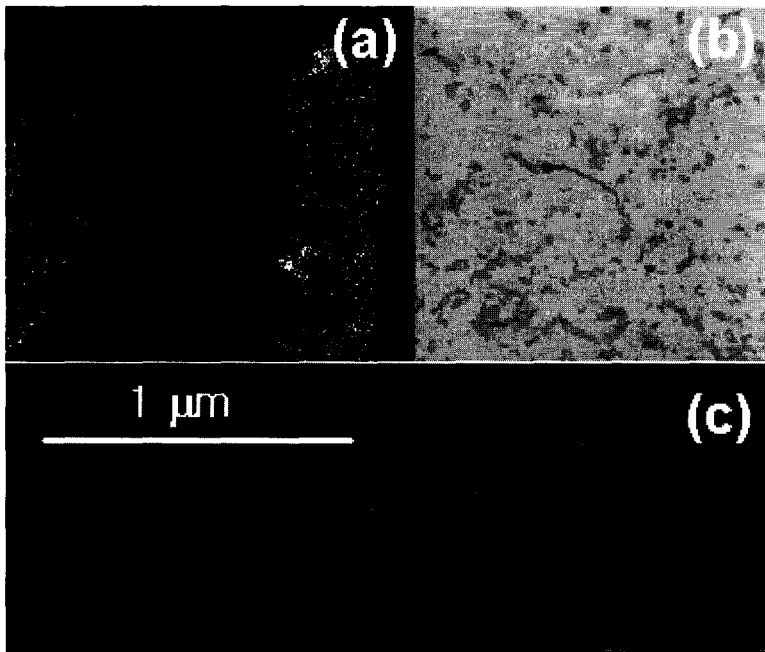


그림 3. 현미경 종류에 따라 얻어진 나노선 종류 (a) PMMA가 코팅된 기판 위에 있는 100nm 두께 정도의 나노선 (b) 광학현미경에 의해 위치가 확인되는 다겹 탄소나노튜브 (c) 원자현미경에 의해 위치가 확인된 단일겹 탄소나노튜브.

### 4. 나노선 위치결정

나노선의 위치를 결정하기 위해서는 현미경 이미지를 얻을 때 상대적인 위치를 결정할 수 있는 방법이 있어야 한다. 배율이 높아 시야가 좁아질 때 상대적인 위치를 파악하는데 특정한 문자형이 필요하며 그림 4는 여러 그룹에서 쓰이고 있는 위치기호를 보여주고 있다[14]. 보통 600배 배율에서 한 화면은  $100\mu\text{m}$  정도 되는 크기가 되어 전자현미경 시야 내에서  $10\mu\text{m}$  간격의 표식을 형성하게 된다. 물론 모양을 구별할 수 있다면 그림 4의 (a)~(d)까지의 어떠한 모양이라도 선택적인 패턴형성에 도움이 된다.

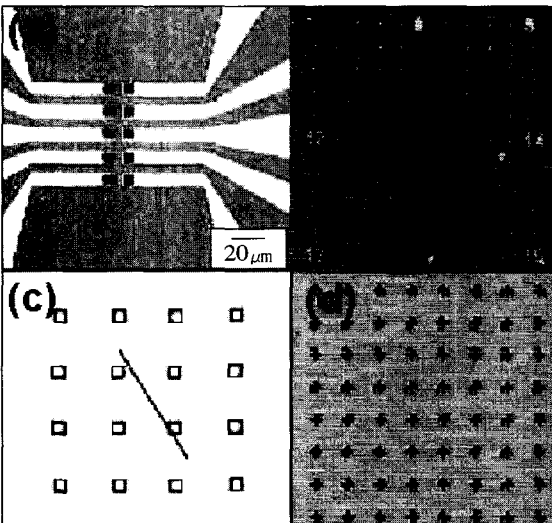


그림 4. 나노선 위치를 파악하는데 사용되는 표식 종류 (a) 전극패턴을 미리 형성시켜 고유한 패턴형태를 만들어 두고 선택적으로 위치 결정 (b) 점패턴에 숫자패턴을 만들어 줌으로써 대략적인 위치를 결정 (c) 고유한 표식자를 만들어두고 나노선의 위치파악 (d) 각 좌표기호를 특징적으로 만들어 언제든지 위치파악이 가능하도록 설계.

이때 고려해야 할 것은 이미지를 얻을 때의 전체화면 크기와 패턴닝 할 때의 전자현미경 상에서의 전체화면 크기이다. 예를 들어 원자현미경의 경우 전체화면 크기가 크지 않아 시야가 더 좁게 되므로 가장 화면 크기가 작은 현미경에 맞추어 표식기호가 새겨져 있

어야 하고 이는 선행적으로 전자빔 패턴닝을 거치거나 광식각공정을 거쳐 형성시킬 수 있다.

### 5. 전자빔 패턴닝

나노선의 위치를 결정한 후 CAD 작업을 통해 나노선에 임의의 선택적인 전극패턴을 설계한 후 패턴생성기를 통해 전자현미경으로 보내어 전자빔을 제어하여 패턴을 그리게 된다. 전자빔 패턴에 있어서 CAD를 통해 얻은 패턴과 실제 기판이 놓여있는 위치의 오차로 인해 보정과정을 거쳐야 하는데 이 때문에 전자빔 패턴에 보정전압이 더해지는 align 작업이 필요하게 된다. 그림 5는 이런 작업들을 통해 최종적으로 얻어진 선택적인 전극패턴의 예를 보여준다.

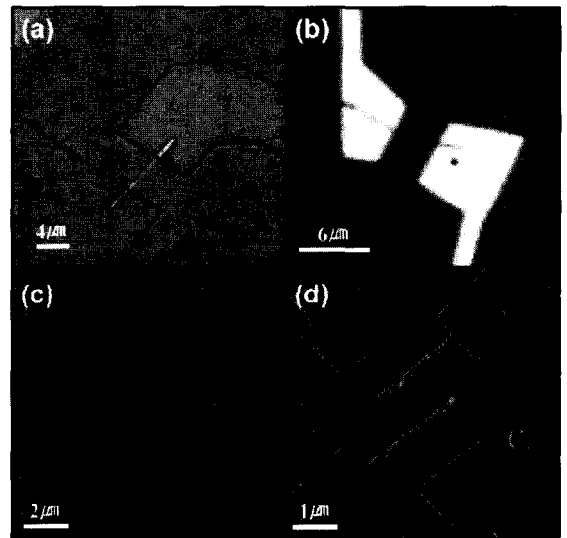


그림 5. (a), (b) 한 개의 나노선에 선택적으로 패턴된 전극패턴 (c) 좌표기호에 따라 위치가 결정된 단일겹 탄소나노튜브 (d) (c)에서 파악된 위치를 기반으로 선택적으로 전자빔 패턴.

### 6. 결론

이상에서 바텀업 방식에서 나노구조체에 대해 선택적으로 전자빔 식각기술을 통해 전극패턴을 형성



시킬 수 있는 방법을 소개하였다. 현재 나노선에 대한 연구에서 전극패턴형성기술은 장치의 용이성 때문에 광식각기술을 이용해서 선택적 패턴을 할 수 있지만 나노미터 급의 크기의 전극에 있어서는 전자빔식각 기술이 필요한 것으로 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] J. Bardeen and W. H. Brattain, Phys. Rev., Vol. 74, p. 230, 1948.
- [2] B. Doyle, et al, Intel. Technology Journal, Vol. 6, p. 42, 2002.
- [3] Rainer Waser (Ed.), Nanoelectronics and Information Technology, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [4] X. Duan and C. M. Lieber, Adv. Mat., Vol. 12, p. 298, 2000.
- [5] S. Iijima, Nature, Vol. 354, p. 56, 1991.
- [6] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and Ph. Avouris, Carbon Nanotubes, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- [7] A. Aviram and M. R. Ratner, Chem. Phys. Lett. Vol. 29, p. 277, 1974.
- [8] L. Langer, et al, Synth. Met., Vol. 70, p. 1393, 1995.
- [9] T. W. Ebbesen, et al, Nature, Vol. 382, p. 6586, 1996.
- [10] S. J. Tans, et al, Nature, Vol. 386, p. 474, 1997.
- [11] T. Djenizian, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 78, p. 2940, 2001.
- [12] K. H. Kim, submitted to Nanotechnology.
- [13] <http://www.raith.com>
- [14] G.T.Kim, U. Waizmann, and S. Roth, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, p. 3497, 2001.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 김강현

◆ 학력

- 2000년 고려대 물리학과 이학사
- 2002년 고려대 대학원 물리학과 이학석사
- 2003년 - 현재 고려대 대학원 전기공학과 박사과정

성명 : 김규태

◆ 학력

- 1992년 서울대 물리학과 이학사
- 1996년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 2000년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경력

- 2000년 LG전자기술원
- 2000년 - 2002년 독일 막스플랑크 고체물리 연구소
- 2002년 - 현재 고려대 전기공학과 교수

