

나노패터닝을 위한 고에너지 전자빔 리소그래피 시뮬레이터 개발 및 검증

김진광, 김학, 한창호, 전국진

서울대학교 전기공학부
전화 : 02-888-6475

A Simulator for High Energy E-beam Lithography for Nano-Patterning

Jinkwang Kim, Hak Kim, Chanho Han, Kukjin Chun

School of Electrical Engineering
Seoul National University
E-mail : stuvex@mintlab.snu.ac.kr

Abstract

Electron beam on high energy acceleration, which travels deeply and sharply through photoresist, became to be used in e-beam lithography apparatus for nano-patterning in due to its high resolution. An advanced electron beam lithography simulation tool is currently undergoing development for nano-patterning. This paper will demonstrate such simulation efforts with experiments at 200 keV e-beam lithography processes on PMMA, ZEP520 of which photoresist parameters and characteristics will be explained with simulation results. Neureuther parameters was extracted from the contrast curve of the resist

I. 서론

전자빔 리소그래피(Electron Beam Lithography)는 고해상도와 높은 정렬 정확도로 인하여 미세 반도체 공정에서 중요하다. 저속의 전자 빔일 경우 전자의 반발의 효과가 커져서 빔을 작게 만들기가 어려우나 높은 에너지의 경우에는 세밀한 전자 빔을 만들 수 있다. 나노 공정 개발을 위해 이미 200 keV, 300 keV의 가속 에너지를

갖는 장비들이 공급되고 있고 이때 전자 빔의 폭이 2 nm에 불과한 것도 있다. 장비의 발전과 함께 시뮬레이션도 그 개선의 필요성이 제기된다. 하지만, 고에너지 전자 빔을 시뮬레이션 하는 데에는 몇 가지 어려움이 따른다.

우선 고 에너지 (>100keV) 전자 빔은 저 에너지 (<50keV) 영역에서와는 달리 상대성 효과의 영향을 받으며, 따라서 전자 산란 모델도 상대성 효과가 고려된 모델로 변경되어야 한다. 이때, 모델이 복잡해지기 때문에 계산 시간이 오래 걸리고, 전자의 도달 거리가 증가되어 그만큼 넓은 영역을 계산해야 한다. 이는 요구되는 계산시간을 급격히 증가시킨다.

그리고, 산란 모델은 전 에너지 영역(1 keV~300 keV)을 하나로 통합한 모델의 적용이 용이하지 않다. 그래서, 다양한 모델들이 각각의 해당 영역에 이용되어왔다. 또한, 에너지가 떨어지는 산란의 후반 부분에서는 저 에너지의 산란 모델이 복합적으로 이용되어야만 한다.

그 외에도, 200 keV 이상의 영역에서 전자빔 리소그래피 실험자료들을 얻기가 쉽지 않았다. 최종 현상 공정(Develop) 시뮬레이션을 위해서는 현상을 계산식을 구해야 하는데 알려진 것이 드물어 직접 현상 파라미터를

추출해야 했다.

본 연구에서는 이러한 고 에너지 전자빔의 노광 공정 시뮬레이션의 결과를 보이고, 적용된 모델과 시뮬레이션 방법, 그리고 제한된 실험 자료를 바탕으로 얻어진 고 에너지에서의 현상률 계산 결과를 보이고자 한다.

II. 시뮬레이터의 기본 구성

개발된 전자빔 리소그래피 시뮬레이터는 그림 1. 에서 보는 바와 같이 세 단계를 통해서 최종적으로 리지스트 형상을 계산한다. 첫째, 전자 에너지에 따른 정교한 전자 산란 모델을 적용하여 하나의 전자 빔이 리지스트에 노광되어 산란되는 분포(Point Spread Function)를 구하고, 둘째, 이를 이용하여 마스크 패턴에 따라 리지스트에 축적된 에너지(Electron Intensity Distribution)를 계산한다. 이때 다양한 노광 공정의 변형이 가능하다. 마지막으로 리지스트의 고유 현상식에 따라 최종 패턴을 예측하게 된다. 그림 1. 의 A, B 는 노광된 리지스트에 축적된 에너지의 양을 나타낸다. 그리고 C 는 삼차원적으로 현상된 프로파일의 예시이다.

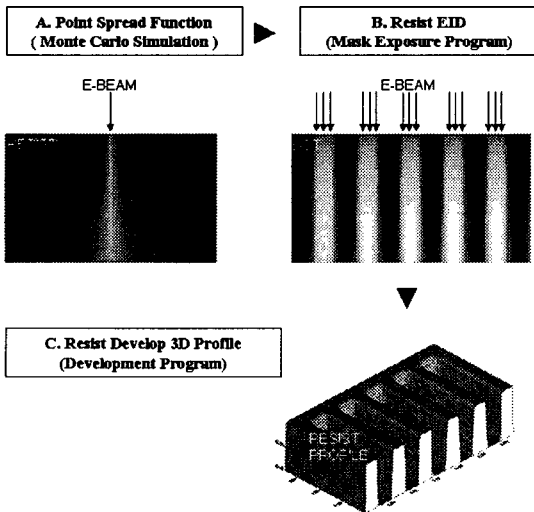


그림 1. E-beam Lithography Simulation Processes:

A. Monte Carlo, B. Exposure, Development.

Point Spread Function 은 한 개 전자의 산란 궤적을 물리적 모델을 통하여 정확하게 추적하여 그 경로를 따라 리지스트에 전달되는 에너지를 기록한다. 이 과정을 무수히 반복하면 통계적인 분포를 구할 수 있다. 개개의 구분된 사건을 통해 통계적인 분포를 얻으면 연속적인 물리적 양을 얻는 방법을 몬테카를로 (Monte Carlo)방법이라고 할 수 있다. 이러한 방법을 응용한 PSF 단계의 시뮬레이션을 본 실험에서는 몬테카를로 시뮬레이션이라 하였다.

고 에너지 시뮬레이션을 위해서는 상대성이론이 적용된 Relativistic Bethe Equation 에너지 손실 식이 이용되었다[3].

또한 추가로, 현상률 포화 현상을 설명하는 현상 모델을 적용해보았고, 200 keV 영역에서의 실험 결과를 바탕으로 ZEP520 의 현상식 파라미터 또한 계산되었다. 우리는 이를 위하여 실험결과를 바탕으로 임의의 현상 식에 대하여 최소자승법으로 최적화 시킬 수 있는 간단한 프로그램을 개발하여 이를 구하였다.

III. 시뮬레이션 모델

2.1 전자 산란 모델

전자 산란 모델은 다음의 세가지로 크게 구분된다. 먼저 전자의 산란에너지 변화는 없고 진행 방향만을 바꾸는 탄성산란(Elastic Scattering), 그리고 에너지 손실이 있는 비탄성산란 (Inelastic Scattering), 그리고 에너지 손실에 대한 모델이 그것이다. 본 연구에서 사용된 모델들을 표 1 에 정리하였다. 이는 기존의 모델들과는 달리 에너지 손실 식에 있어서 Relativistic Beth Equation 이 적용된 점이 기존의 차이점이다 [1] [2].

기존의 이용되던 에너지 손실 식은 전자의 에너지가 리지스트의 이온화에서지 J 가 1/1.66 배 이하가 될 때 음수가 되는 것을 보정한 Joy and Luo 의 변형 식을 이용하였고, 고 에너지 영역에서는 Relativistic Bethe Equation 인 다음의 식을 이용하였다[2].

$$-\frac{dE}{ds} = \frac{2\pi e^4}{mv^2} nZ \left[\ln \frac{mv^2 E}{2J^2 \gamma^2} - (2\gamma - \gamma^2) \ln 2 + \gamma^2 + \frac{1}{8}(1-\gamma)^2 \right] \quad (1)$$

$$E = mc^2(\gamma - 1), \gamma = \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

이를 통해 전자의 에너지 전달률을 계산하는데 필요한 미분 산란 단면적을 알 수 있다.

표 1. Comparison of models in each energy region

Modes	0.1 keV~ 30keV	30keV~200keV
Elastic Scattering	Tabulated Mott	Rutherford
Inelastic Scattering		
Outer shell	Moller	Moller
Inner shell	Vriens	Moller
Energy loss	Bethe equation by Joy and Luo,	Relativistic Bethe equation

2.2 리지스트 현상 모델

리지스트 현상 모델로는 기존에는 비교적 간단한 Neureuther 모델이 쓰여 왔다[1][3].

$$R(D) = R_1 \left(1 + \frac{D}{D_0} \right)^n \quad (2)$$

이때 R 은 Dose 에 따른 현상률이며 Dose 를 Deposited Energy 를 이용한 식으로 대치되어 이용되었다. 이때 깊이 방향의 Deposited Energy 값을 이용하게 된다. 또한 이 모델에 대해 실험값을 적용시켜 현상 파라미터를 구할 수 있었다. 하지만 이것은 Develop Rate 에 어떤 한계 값이 있을 때 이러한 현상률의 포화 현상을 설명하기 어렵고 특히 ZEP520 의 리지스트의 경우 이러한 현상이 관찰되어 이를 나타낼 수 있는 Mack 모델이 연구되었다. 이를 여기에 소개하자면 다음과 같다[4].

먼저, Mack 모델은 normalized 된 photosensitive 물질의 농도 변수 M 을 사용한다. 이는 다음과 같이 나타내지며,

$$M = \exp(-CD) \quad (3)$$

이때, C 는 반응 상수 D 는 축적된 에너지이다. 그리고 최종 식은

$$R = R_{max} \left\{ \frac{(a+1)(1-M)^n}{a+(1-M)^2} \right\} + R_{min} \quad (4)$$

$$a = \frac{(n+1)(1-M_{th})^n}{(n-1)} (const.)$$

이다. 여기서 R_{max} 는 현상률의 최대 값이고 R_{min} 은 현상률의 최소값이고, M_{th} 는 현상률의 threshold 이다.

IV. 고 에너지 전자빔 시뮬레이션

고 에너지의 리지스트 내의 산란 특성은 Point Spread Function(PSF)을 살펴보면 그 경향을 알 수 있다. 그 경향은 그림 2에서 나타내고 있는 것과 같았다. 이는 모델 파라미터가 잘 알려진 PMMA 리지스트에 대해 다양한 에너지의 PSF 살펴 봄으로써 알 수 있는데 그 경향을 소개하면 다음과 같다.

각 PSF 분포의 상단 그림을 보면 고 에너지가 되면서 전자의 투과 깊이가 현저히 깊어짐을 알 수 있다. 저 에너지와 달리 매우 넓은 영역의 시뮬레이션이 요구된다는 시뮬레이션 해상도 1 nm 를 위한 PSF 를 얻기 위해서는 저 에너지의 경우 수 만개의 전자의 궤적이 요구되지만 고 에너지의 경우에는 최소 이 십 만개 이상의 전자의 궤적을 이용한 PSF 가 필요하였다. 물론 필요에 따라 높은 정밀 도가 요구되지 않는다면 그보다 적은 개수도 가능하다. 또한 아래 부분의 확대된 부분에서 관찰 할 수 있듯이 오히려 고 에너지 일 때 에너지 전달률은 떨어지게 되어 Contrast 가 클에도 불구하고 Dose 를 늘려야 하는 약점이 있음을 알 수 있다.

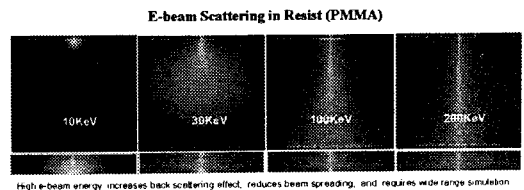


그림 2. 10keV~200keV 에서의 PSF 의 변화
각 그림의 아래 부분은 상단의 표면확대임

이러한 변화는 보다 구체적으로 ZEP52의 깊이 방향의 에너지 분포에서도 알 수 있다. 그림 3에서와 같이 200keV에서 에너지 전달률이 현저히 떨어진다.

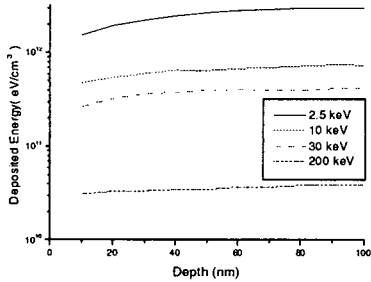


그림 3. Accumulated energy for 1 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ dose in depth direction; 100 nm thick ZEP520 resist on Silicon

그리고 변형된 전자 현미경 장비에서 얻어진 200keV 영역에서의 ZEP520 실험을 바탕으로 Neureuther 모델로 근사화된 식은 아래의 그림 4와 같다.

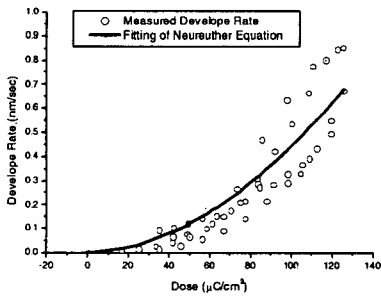


그림 4. Develop rate fitting result ZEP520

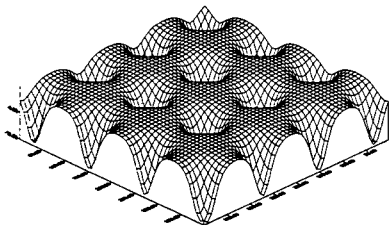


그림 5. Gray scale 60nm dot mask simulation

이렇게 얻어진 현상식을 바탕으로 그림 5와 같은 최종 현상 프로파일을 얻었고 이는 특별히 장비의 특성상 Gray

Scale Dot 마스크가 적용되었다.

V. 결론

본 연구를 통해 고 에너지에서의 200keV 영역에서 전자빔에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 저 에너지 전자빔과 고 에너지 전자빔의 노광 현상을 비교하였다. 또한 현상 모델의 파라미터를 실험결과로부터 추출하여 ZEP520의 최종 현상 모양을 얻었다. 이 시뮬레이터가 새로운 나노공정 기술 개발분야에 적극 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

실험을 통해 도움을 주신 서울대학교 Nano Fabrication 실험실의 김기범 교수님께 감사 드리며, 본 연구는 테라 레벨 나노 소자 개발 (TND) 사업의 지원을 받았다.

References

- [1] Y.J. Lee, W.J. Lee, and K. Chun, "New three dimensional simulator for low energy (~1keV) electron beam systems", J. Vac. Sci. Technol. B 17(6), Nov/Dev 1999
- [2] V.V. Ivin, M.V. Silakov, G.A. Babushkin, B. Lu, P.J. Mangat, K.J. Nordquist, and D.J. Resnick, "Modeling and simulation issues in Monte Carlo calculation of electron interaction with solid targets", Microelectronic Engineering, Vol. 69, pp. 594-605, 2003.
- [3] A.R. Neureuther, D.F. Kyser, C.H. Ting, "Electron-Beam Resist Edge Profile Simulation," IEEE Trans. On Electron Devices, vol. ED-26, no.4, pp.686-693, Apr. 1979
- [4] C.A. Mack, "Electron Beam Lithography Simulation For Mask Making", Part 1 17th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management, pp. 25-37, Apr. 1997