

Resist 표면 거칠기 예측을 위한 전자빔 리소그래피 시뮬레이션에 관한 연구

김 학, 한 창 호, 이 기 용, 이 우 진, 전 국 진
서울대학교 전기컴퓨터공학부, 반도체 공동연구소
전화 : 02-874-5979 / 핸드폰 : 011-9059-9330

A Study on Electron-beam Lithography Simulation for Resist Surface Roughness Prediction

Hak Kim, Chang-Ho Han, Ki-Yong Lee, Woo-Jin Lee, Kuk-Jin Chun
School of Electrical Engineering and Computer Science, and Inter-university
Semiconductor Researcher Center, Seoul National University
E-mail : hawk@mintlab.snu.ac.kr

Abstract

This paper discusses the surface roughness of negative chemically amplified resists, SAL601 exposed by E-beam direct writing system. Surface roughness, as measured by atomic force microscopy, have been simulated and compared to experimental results. Molecular-scale simulator predicts the roughness dependence on material properties and process conditions. A chemical amplification is made to occur in the resists during PEB process. Monte-Carlo and exposure simulations are used as the same program as before. However, molecular-scale PEB simulation has been remodeled using a two-dimensional molecular lattice representation of the polymer matrix. Changes in surface roughness are shown to correlate with the dose of exposure and the baking time of PEB process. The result of simulation has a similar tendency with that of experiment.

I. 서론

전자빔 리소그래피의 구현을 위해 지금까지의 전자빔 리소그래피 시뮬레이션은 폴리머 감광막이 균일한

물질로 이루어져 있다는 가정 하에, 전자빔에 의해 전달되는 에너지를 계산하고 현상액에 의해 용해되는 용해율을 계산하였다. 에너지와 용해율 역시 그 윤곽이 평탄하며, 패턴의 프로파일을 예측하는 과정도 평탄한 표면을 가정하게 된다. 따라서 기본적인 패턴의 프로파일을 예측하는 것은 기존의 리소그래피 시뮬레이션으로 가능하지만, 나노미터 단위의 감광막을 나타내기에는 한계가 있다. 그림 1은 미세패턴에서 감광막의 거칠기가 실제 CD(Critical Dimension)에서 차이를 보일 수 있음을 보여주고 있다. 지금까지 전자빔 리소그래피 공정과 시뮬레이션의 정확성 관련하여 많은 실험들이 진행되고 있으며, 이러한 일련의 실험과 시뮬레이션을 보면 감광막의 표면 거칠기는 감광막의 자체의 물성, 노광 공정, PEB 공정, 현상 공정에 이르기까지 복합적인 요인에 의해 발생하는 것임을 알 수 있다.[1,2,3,4,5,6,10,11,12]

본 연구는 전자빔 묘화에서 감광막의 표면 거칠기를 예측하기 위한 것으로써, 실리콘 위에 감광막을 스펀 코팅하고 전자빔으로 노광, 현상액으로 패턴을 형성하는 일련의 과정에서 감광막의 거칠기에 영향을 줄 수 있는 요소들을 파악하고, 전자빔에 의해 형성되는 감광막 패턴의 표면 거칠기를 예측할 수 있는 분자단위 시뮬레이션을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 분자단위 시뮬레이션을 새롭게 도입하여 계산하고, 그 시뮬레이션의 결과는 AFM(Atomic Force Microscope)을 통해 측정된 음성 감광막 SAL601의 실험 결과와

비교하였다. 또한 분자 단위 시뮬레이션의 결과로 예측되는 현상된 감광막의 프로파일을 실험결과의 프로파일과 비교함으로써 동일한 경향성을 확인하였다.



그림 1. 0.15μm Line & space pattern의 벽면 거칠기

II. Simulation model

2.1 Electron-beam lithography simulation

전자빔 리소그래피 시뮬레이터는 일반적으로 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이터, 노광(Exposure) 시뮬레이터, 현상(Develop) 시뮬레이터로 이루어져 있다. 그리고 화학증폭형 감광막의 경우는 노광 후 PEB(Post Exposure Bake) 공정을 거치기 때문에, PEB 공정에 대한 시뮬레이터가 포함된다.

2.2 표면 거칠기 시뮬레이션

2.2.1 감광막 거칠기

감광막의 거칠기는 표면 거칠기와 벽면 거칠기로 나눌 수 있으며, 감광막을 스펀코팅한 직후의 경우는 감광막을 구성하고 있는 폴리머에 기인되며, 벽면 거칠기는 현상을 한 이후 패턴이 드러난 후에 나타난다. 표면 거칠기가 감광막과 대기의 경계면에서 생기는데 반해, 벽면 거칠기는 노광된 감광막과 노광되지 않은 감광막의 경계에서 생기는 차이가 있다. 그러나 노광 여부에 따른 경계면은 현상이 이루어지면서 결국 표면 거칠기와 같이 대기와의 경계면이 된다. 따라서 노광 에너지에 따라 화학반응이 이루어진 잠상의 영향을 고려한다면 표면 거칠기와 벽면 거칠기는 같은 경향성을 띄게 된다.

현상 공정 후 표면 거칠기의 정도는 공정에 의한 거칠기와 감광막 폴리머에 의한 거칠기의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{process}}^2 + \sigma_{\text{polymer}}^2$$

감광막 Polymer에 의한 거칠기는 감광막을 코팅한 후 측정을 통해 알아낼 수 있고 다음과 같이 RMS(root mean square)값으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - Z_{av})^2 \right]^{1/2}$$

여기서 z_i 는 i 번째 지점의 데이터의 높이이며, Z_{av} 는 모든 지점의 데이터 높이의 평균값이다.

2.2.2 격자 시뮬레이션

거칠기 예측을 위한 분자 단위의 시뮬레이션에서는 대신 감광막이 기본적인 구성 물질인 다양한 길이의 폴리머 체인으로 얽혀 있다는 것을 바탕으로, 노광 또는 PEB 공정을 거치면서 전자의 에너지에 따른 산의 분포와 열에너지에 따른 산의 확산 등을 중요한 요소로 간주해야 한다. 몬테카를로 시뮬레이션은 기존의 시뮬레이터를 사용하여 셀을 더 세분화하여 폴리머의 모노머 크기와 모노머 사이의 결합길이 등을 고려하여 지금까지의 셀 크기보다 작은 1nm로 셀을 나누어 데이터를 만들었다. 그림 2는 감광막의 격자 모델을 한 것이다. 한 폴리머 체인에서 하나의 모노머의 위치를 결정 후 체인을 구성하여 다른 체인이 같은 격자에 들어가지 않도록 하였으며, PAG는 폴리머를 모두 구성한 후 다시 랜덤 변수를 통해 임의로 배치하였다.

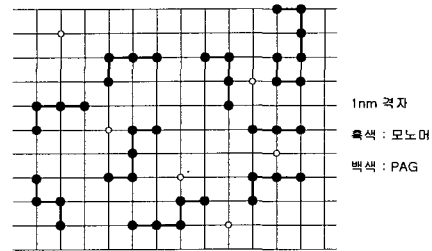


그림 2. 감광막의 격자모델

III. 실험 및 결과

3.1 Simulation을 통한 거칠기 예측 결과

기본 폴리머의 구성, 노광시 산의 생성, PEB 공정시 산의 확산과 손실을 고려하여 감광막의 거칠기를 분자 단위 시뮬레이션을 사용하여 분석하였다. 그림 3은 노광 도즈와 PEB time에 의한 확산 손실의 계산으로 시뮬레이션된 거칠기 결과를 보여준다. 실제 시뮬레이션 결과는 랜덤 변수에 의해 결과에 변화가 있으나, 여러 번의 시뮬레이션 결과를 평균하여 다항식 fitting을 하여 얻어진 결과이다. PEB 시간이 증가할수록 도즈가 커질수록 거칠기는 줄어든다. 그러나 계속된 도즈의 증가나 PEB 시간의 증가는 다시 거칠기를 크게 하고 있다. 이것은 확산을 하고 있는 산의 많은 양이 trap되고 일부의 산이 확산을 계속함으로써, 표면 거칠기를

증가시키는 것이라고 볼 수 있다. 짧은 PEB 시간과 적은 도즈에서 거칠기가 일부 감소하는 것을 볼 수 있다. 노광시 생성된 산이 너무 적거나, 확산 길이가 짧아지면 crosslinking 반응의 범위가 줄어들고 실제 crosslink 반응이 별로 일어나지 않는 것을 의미한다. 이런 상황에서는 감광막의 기본적 구성에 의한 거칠기

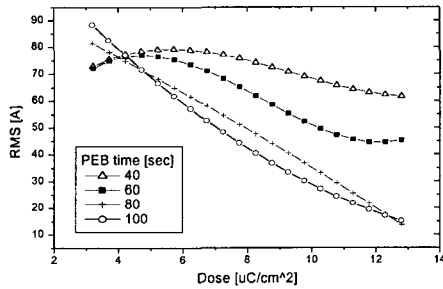


그림 3. 거칠기 변화에 대한 시뮬레이션 결과 도즈에 대한 변화

를 주의해야하며 PEB 공정 시의 거칠기는 가열 시간의 함수로 단순 증가한다고 보여진다.

시뮬레이션 결과, 패턴의 표면 거칠기에 대한 구체적인 형상을 그림 4에 나타내었다.

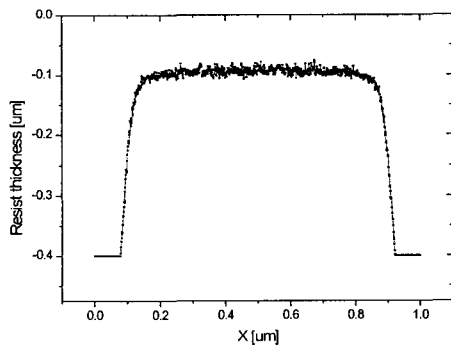


그림 4. 노광 도즈 8C/cm², PEB 시간 60sec, 0.8μm 라인 패턴의 표면 거칠기.

3.2 SAL601 감광막 실험

분자단위 모델링으로 시뮬레이션 한 결과를 실험값과 비교하기 위해 음성 감광막 SAL601을 사용하여 실험을 진행하였다. 실험은 4인치 Si 웨이퍼에 감광막을 코팅하고 direct writing하여 수행하였다. 사용된 리소

그래피 시스템은 Leica Cambridge EBMF 10.5 이며 가속 전압으로 30kV를 사용하였으며 가우시안 빔 모양을 갖는다.

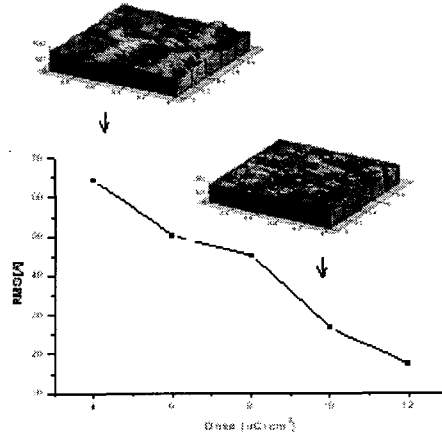


그림 5. Dose에 대한 거칠기 변화(AFM 결과)

노광 패턴은 확산상수를 검증하기 위해 L/S (Line & Space) 패턴과 AFM 데이터를 얻기 위해 1mm X 1mm 패드 패턴을 사용하였다. 그림 5에 거칠기의 실험 결과를 AFM 이미지를 사용하여 표현하였다. 도즈가 4C/cm²에서 12C/cm²으로 증가하면서 RMS값은 64.2에서 17.3로 줄어들었으며 AFM 이미지 상에서 그 차이를 볼 수 있다. 그림 6은 PEB time과 도즈에 따른 각각의 영향을 나타낸 것이다. 측정 결과를 보면 노광 도즈에 따라 그리고 PEB 시간에 따라 극명하게 바뀌는 거칠기를 관찰할 수 있다. 그래프에 따르면, 노광 도즈가 클수록, 그리고 PEB 시간이 길수록 감광막의 거칠기가 줄어든다. 이 결과는 그림 7에서 나타낸 것과 같이 시뮬레이션 결과와 경향이 일치하는 것이다.

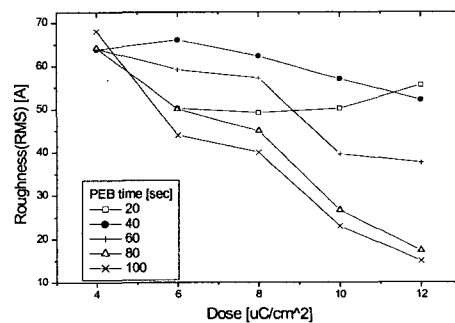


그림 6. PEB 시간에 따른 거칠기 변화 측정 결과

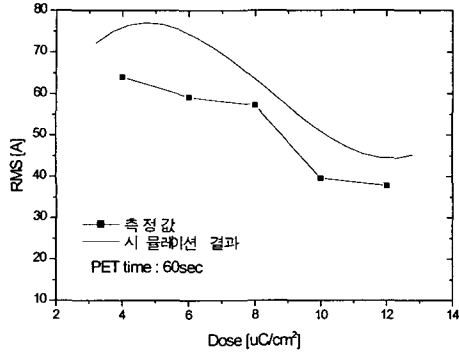


그림 7. 도즈에 따른 거칠기 변화 비교

V. 결론

분자단위 리소그래피 시뮬레이션은 기존의 시뮬레이션 중 몬테카를로 시뮬레이션, 노광 시뮬레이션을 사용하고, 1nm의 격자 모델링을 이용하여 PEB 공정을 분석함을 통하여 가능하였다. 시뮬레이션 결과는 PEB 시간과 도즈의 따라 변화하는 것을 보여주고 있으며, 분자단위 시뮬레이션에서의 결과가 랜덤 변수를 사용하여 계산되므로 많은 반복적 계산을 통해 근사함으로써 경향성을 보여주고 있다. 또한 패턴에 대한 구체적인 형상화를 통해 기존의 시뮬레이션과 비교가 가능하였다.

이러한 시뮬레이션 결과는 실험에서 측정된 거칠기와 동일한 경향성을 보였다. 따라서 도즈가 커질수록, PEB 시간이 길어질수록 거칠기가 줄어들며, 감광막의 구조와 PEB 공정의 영향이 거칠기에 주요 요소가 됨을 확인하였다.

후 기

본 논문은 서울대학교 반도체 공동연구소와 System IC 2010의 지원, 두뇌한국 21사업의 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌(또는 Reference)

[1] D. He and F. Cerrina, "Process dependence of roughness in a positive-tone chemically amplified resist", JVST. B 16, 3748(1988)

[2] G. W. Reynolds and J. W. Taylor, "Factors contributing to side wall roughness in a positive-tone, chemically amplified exposed by x-ray lithography", JVST B 17, 334 (199)

[3] T. Yoshimura, H. Shiraishi, J. Yamamoto, and S. Okazaki, JJAP Part I 32, 6065 (1993)

[4] R. Guerrieri and A. R. Neureuther, IEEE trans. Comput.-Aided Des. 7, 755 (1998)

[5] P. Trenfonas III, Proc. SPIE 1086, 484 (1989)

[6] E. W. Scheckler, S. Shukuri, and E. Takeda, "Molecular-scale models for simulation of nanometer lithography with application to a negative chemical amplification resist", VLSI Tech. Digest of Technical papers, (1993)

[7] Y. J. Lee, W. J. Lee, K. J. Chun and H. S. Kim, "New Three Dimensional Simulator for Low Energy (~1keV) Electron Beam Systems" J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 17, no. 6, pp. 2903-2906, Nov/Dec 1999

[8] Y. M. Ham, K. H. Baik, W. K. Lee, T. D. Chung and K.Chun, "Application of New Empirical Model to the Electron Beam Lithography Process with Chemically Amplified Resists," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, 1998, p.6761-6766

[9] S. H. Kim, Y. M. Ham, W. K. Lee, K. J. Chun, "New Approach of Monte Carlo Simulation for Low Energy Electron Beam Lithography," Microelectronic Engineering, vol. 41/42, pp. 179-182, 1998

[10] P. M. Dentinger, etc "Evaluation of photoacid generators in chemically amplified resists for x-ray lithography using an on-wafer photoacid determination technique", SPIE Proceedings Vol. 3676 pp.466-472

[11] J. Crank, The Mathematics of Diffusion (Oxford University Press, Oxford, 1975), pp. 1-4

[12] A. A. Krasnoperova, M. Khan, S. Rhyner, J. W. Taylor, Y. Zhu, and F. Cerrina, "Modeling and simulations of a positive chemically amplified photoresist for x-ray lithography", J. Vac. Sci. Technol. B 12(6), Nov/Dec, 3900 (1994)