論文96-33A-6-17

전자빔 리토그라피에서 스트링모델을 이용한 3차원 리지스트 프로파일 시뮬레이션

(3-D Resist Profile Simulation using String Model on E-beam Lithography)

徐 泰 源 *, 咸 泳 穆 **, 全 國 鎭 **, 李 鍾 德 **

(Taeweon Suh, Youngmog Ham, Kukjin Chun, and Jong Duk Lee)

요 약

본 논문은 전자빔 묘화에서 근접효과를 줄이기 위하여, 전자빔에 의해 형성되는 감광막의 단면 프로파일을 예측할 수 있는 모의실험 프로그램을 개발하는 것이다. 모의실험 프로그램은 몬테카를로 모의실험, 노광모의실험, 현상모의실험으로 구성하였다. 몬테카를로 모의실험에서는 Rutherford의 미분산란 단면적과 Moller의 이론을 기초로 하는 복합산란모델을 사용하여 전자가 입사되었을 때 감광막에 저장되는 에너지를 계산하였다. 그리고, 노광모의실험으로 실제패턴에 전자빔이 입사됐을 때 감광막에 저장되는 에너지를 계산하였다. 현상모의실험에서는 스트링모델을 이용하여 현상시간에 따른 감광막의 현상프로파일을 얻었다. 실험에서는 EBMF10.5 전자빔 묘화장비를 이용하여 PMMA전자빔용 감광막의 리지스트 프로파일을 검증하였다. 실험에서 제작된 패턴은 0.2μm, 0.3μm선폭의 패턴이며 모의실험결과와 비교하여 모의실험의 정확도를 분석하였다.

Abstract

The purpose of this paper is to develop a simulation program to predict resist profile in electron-beam lithography, where the main issue is proximity effect. The simulation program composes of Monte Carlo simulation, exposure simulation and development simulation. In Monte-Carlo simulation, the absorbed energy in the resist is calculated when one electron is incident into resist, using hybrid model on the basis of the Rutherford differential scattering cross section and Moller theory. In exposure simulation, the absorbed energy in the resist is calculated when electrons are incident in exposure pattern. In the program, the developed profile depending on time is obtained by string model. The 0.2μm and the 0.3μm line and space patterns are experimentally delineated and compared to the simulation results to check the relevance of the program.

Ⅰ. 서 론

VLSI의 집적도가 증가함에 따라 lithography분야의 역할이 더욱 중요해지고 있다. 이에 따라, deep submicron 소자제작을 위한 선행기술로 X-ray, 전자빔 등의 기술이 연구되고 있으며, 그 중 고해상도를 가진 전자빔 노광기술을 256M DRAM급 이상의 고집적 회로의 제작에 적용하기 위해서는, 근본적인 문제인 전자들이 리지스트와 기판 내에서 산란하여 패턴을 왜곡시키는 근접효과를 개선해야한다. 이러한 근접효과를 개선하기 위해서는 여러 가지 방법들이 제안되어지고 있는데, 공정 상에서는 multilayer resist[1][2], thin resist, high energy beam[3], low energy beam[4] 등의 방법이 연구되어지고 있고, 소프트웨어적으로는

* 準會員, LG電子
(LG Electronics)
** 正會員, 서울大學校 電氣工學部
(School of Elec. Eng., Seoul National Univ.)
接受日字: 1995年6月26日, 수정완료일: 1996年5月9日

dose modification[5][6], pattern modification등이 연구되어지고 있다. 이 중에서 소프트웨어적으로 근접효과를 개선하기 위해서는 전자산란 모의실험을 통해 전자의 산란정도를 예측하고, 리지스트 프로파일 모의실험을 통해 근접효과의 발생정도를 예측해야 한다.

본 논문에서는 몬테카를로 모의실험을 통해 전자의 산란을 예측했으며, string 모델을 이용한 현상 모의실험을 통해 근접효과가 발생함을 확인하였고, 현상된 리지스트 프로파일을 실험과 비교하였다. 현상모의실험을 하기 위해서는 먼저 전자빔이 노광 됐을 때 리지스트에 저장되는 에너지를 구하였으며 각각의 cell(리지스트를 cell로 나눔)에 대한 현상율이 결정되어 리지스트 프로파일을 알 수 있게 하였다. 또한 몬테카를로 모의실험기법으로 전자 하나가 입사됐을 때 리지스트에 저장되는 에너지를 구하여 가우시안 빔과 convolution하여 가우시안 빔이 노광 됐을 때 리지스트에 저장되는 에너지를 구하였다. 실제 패턴은 이러한 가우시안 빔이 여러 개 모여서 이루어지므로 가우시안 빔 superposition과정을 거쳐 패턴에 대한 리지스트에 저장되는 에너지를 계산하여 현상모의실험을 수행하였으며, 모의실험 결과와 실험적 결과와 비교 비교분석하여 현상모의실험 결과를 검증하여 보았다.

Ⅱ. 모의실험

1. 몬테카를로 모의실험[7][8]

전자산란의 형태는 탄성산란과 비탄성산란으로 구분된다. 탄성산란은 입사전자와 원자가 충돌을 할 때 이차전자의 생성을 고려하지 않으며, 비탄성산란은 충돌시 이차전자의 생성과 산란을 고려한다. 단일산란모델에서는 탄성산란만을 사용하여 전자의 산란, 저장에너지를 계산하며, 복합산란모델에서는 탄성산란과 비탄성산란을 모두 고려한다. 본 논문에서는 탄성산란의 경우 Rutherford의 산란단면적을, 비탄성산란의 경우 Moller의 이론을 사용하였고 모의실험은 복합산란모델을 적용하였다.

2. 노광 모의실험

노광모의실험에서는 몬테카를로 모의실험결과를 이용하여, 실제패턴에 대한 리지스트에 저장되는 에너지를 계산한다. 이것은 다음과 같이 가우시안 빔에 대해 리지스트에 저장에너지를 계산하는 가우시안 빔 convolution과 이의 결과를 superposition하여 실제패턴에 대한 리지스트에 저장되는 에너지를 계산하는 가우시안 빔 superposition을 거쳐 계산된다.

1) 가우시안 빔 convolution

모의실험에서는 가우시안 빔 하나를 전자 하나로 생각한다. 이것을 정규화된 가우시안 빔(체적이 1)이라고 부르며 σ가 표준편차일 때, 다음 식과 같이 표현된다.

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right]$$

3-D 가우시안 빔을 몬테카를로 cell 크기로 나누어, 각각의 근사적인 사각기둥의 체적의 값과 몬테카를로 모의실험의 결과를 아래 식에 따라 convolution하면 실제 가우시안 빔에 대한 결과가 나오게 된다. 이 때 사용된 가우시안 빔의 지름은 실제 실험과 맞추기 위해 90nm로 잡았으며, convolution하는 범위는 가우시안 빔 표준편차의 4배만큼을 취하여, 99%이상의 체적이 convolution되도록 하였다.

$$E(i,j,k)=f(i,j)\otimes D(i,j,k)$$

$$E(i,j,k)=\sum_{p=-m}^{m}\sum_{q=-m}^{m}\sum_{l=-n}^{n}\sum_{n=-n}^{n}f(i+(2p+1)\frac{\Delta}{4},j+(2p+1)\frac{\Delta}{4})D(i-p,j-q,k)$$

위 식은 p또는 q가 -1일 때는 제외되며, $E(i,j,k)$는 하나의 가우시안 빔에 대한 응답, $f(i,j)$는 정규화된 가우시안 빔의 미소체적, $D(i,j,k)$는 몬테카를로 모의실험결과, Δ는 몬테카를로 cell 크기(250Å), n은 몬테카를로 산란범위에 대한 cell 크기의 비, m 은 $4\sigma/\Delta$을 나타낸다.

2) 가우시안 빔의 중첩(superposition)

패턴은 가우시안 빔의 합으로 이루어지므로 convolution에 의한 결과를 패턴에 대해 superposition하면 패턴에 대한 리지스트에 저장되는 에너지가 계산된다. 노광하는 pixel 크기가 정해져 있으므로 pixel 크기와 cell 크기의 비가 정수가 되도록 cell 크기를 지정해 주어야 가우시안 빔 중첩을 할 때 문제가 발생하지 않는다.

모의실험 입력 파라미터로는 몬테카를로 모의실험의 입력인 cell 크기, 몬테카를로 데이타 파일, 몬테카를로 데이타 파일의 저장 거리, PMMA의 두께, pixel 크기 즉, 전자빔장치의 노광단위(1.6384mm field 크기의 경우, pixel 크기는 50nm), 가우시안 빔의 FWHM(full width half maximum), 도즈, 노광하는 패턴을 반전

할 것인가를 나타내 주는 pattern inversion, 노광패턴 정보(직각삼각형과 사각형)를 지정해 준다.

3. String 방식의 현상 모델[9]

String 모델에서는 리지스트 표면에 노드(node)들을 지정해주고, 노드들의 진행위치에 따라 결정되는 cell 에너지에 따라 현상율이 결정된다. 각 노드들은 cell 당 1개정도면 충분하며, 노드들이 진행해 나감에 따라 노드의 간격이 벌어지거나 좁아질 수가 있기 때문에 노드 삽입, 제거가 필요하다. 노드들의 진행방향 결정은 각의 이등분선 즉, 3차원 모의실험의 경우 하나의 노드를 중심으로 4개의 노드가 둘러싸고 있는데 중심노드와 오른쪽, 왼쪽노드가 이루는 각의 이등분 평면과 위쪽, 아래쪽노드가 이루는 각의 이등분 평면의 교선 방향으로 진행한다. 교선 방향은 2개가 있으며, 그 중 cell 에너지가 작은 쪽으로 진행하는 것을 원칙으로 하되, cell 에너지가 크더라도 z축 좌표가 커지면, 즉 리지스트-기판 경계에 가까운 쪽으로 방향을 선택한다. 이러한 방향을 설정하기 위해서 각각의 노드들은 위, 아래, 왼쪽, 오른쪽노드와 상호 유기적인 연결관계로 있어야 하는데, 이를 위해 노드를 표현하기 위한 자료구조로 cross linked list를 썼다. Cross linked list에서 하나의 노드는 그것을 둘러싸고 있는 위, 아래, 오른쪽, 왼쪽노드의 주소를 가지고 있다.

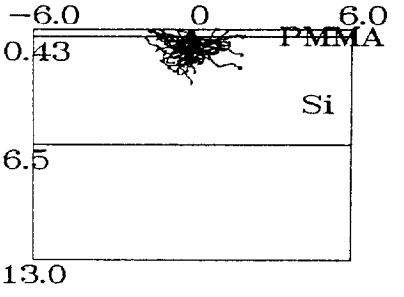
모의실험 입력 파라미터로써 현상할 window 크기, cell 당 노드의 개수, 현상율(Å/sec), 현상시간, 현상시간 step, 현상결과 출력 파일명, 현상 데이타를 몇 초마다 한번씩 저장할 것인지를 지정해 준다.

Ⅲ. 모의실험결과

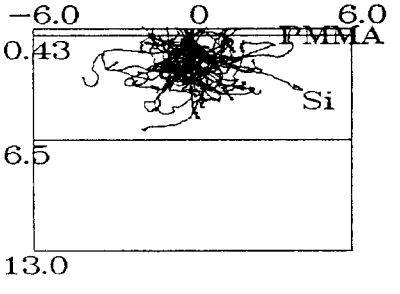
1. 몬테카를로 모의실험 결과

모의실험은 실리콘 표면에 PMMA감광막을 입혔을 경우에 대하여 하였다. 일반적으로 전자산란 형태와 리지스트에 저장되는 에너지는 전자의 가속에너지에 따라 다르므로 가속에너지 20keV와 30keV에 대해 모의실험하였다.

그림 1은 20keV와 30keV로 입사된 전자 70개의 산란궤적이다. 그림 1에서의 단위는 μm이다. 그리고, 전자 2만개에 대해 모의실험했을 때, PMMA두께 0.43 μm에 대해, 가속전압 20keV에서는 3.25μm, 30keV에서는 7.1μm까지 Si 안쪽으로 전자가 들어갔다. EID(Energy Intensity Distribution)는 리지스트와 기판의 경계에서, 전자가 입사된 지점으로부터 수직방향의 거리에 따른 에너지의 분포를 나타낸다. top과 bottom은 각각 웨이퍼위에 PMMA를 도포하였을 때 윗부분과 PMMA-웨이퍼 경계를 나타낸다.



(a) 20 KeV



(b) 30 KeV

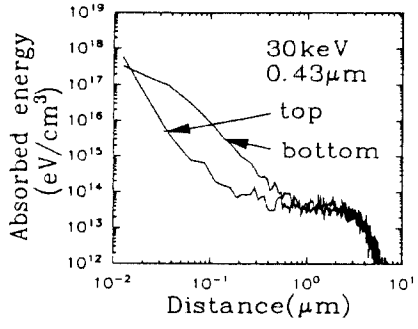
그림 1. 가속에너지에 따른 전자산란궤적
Fig. 1. Electron scattering trajectories for different acceleration energy.

그림 2는 전자의 에너지와 PMMA의 두께에 따른 EID 모의실험결과를 나타내며, top과 bottom은 각각 웨이퍼위에 PMMA를 도포하였을 때 윗부분과 PMMA-웨이퍼 경계를 나타낸다. 보통 다음 식과 같이 두개의 가우시안으로 근사한다.

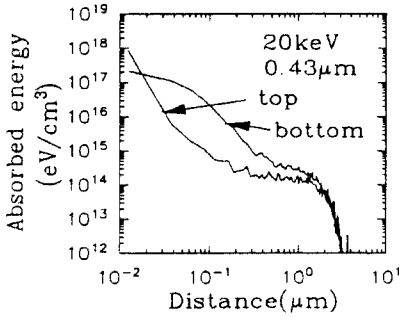
$$f(r)=\frac{1}{\pi(1+\eta)}\left[\frac{1}{\alpha^2}\exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right)+\frac{\eta}{\beta^2}\exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right)\right]$$

여기서 α는 전방산란, β는 후방산란, η는 후방산란에 대한 전방산란의 비를 나타낸다.

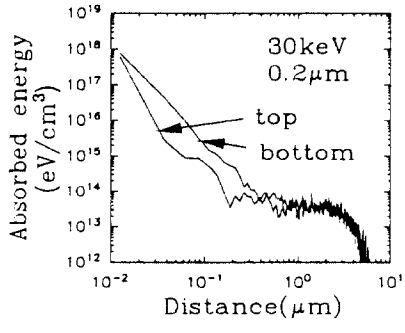
Cell 크기를 250Å으로 잡고 모의실험을 하면 리지스트 표면에서 가까운 부근 (<0.2μm)에서는 bottom이 top보다 전방산란 peak가 크게 나오는데 그것은 다음과 같은 이유에서이다. 전자가 입사할 때 처음에는 입사점에서 θ, φ가 0° 방향으로 진행을 하고, 그 다음



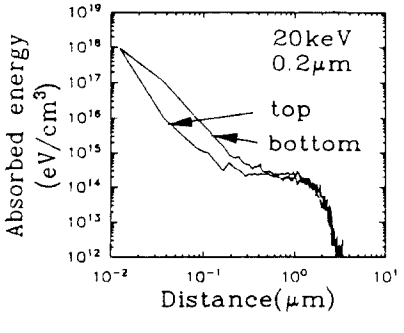
(a)



(b)



(c)



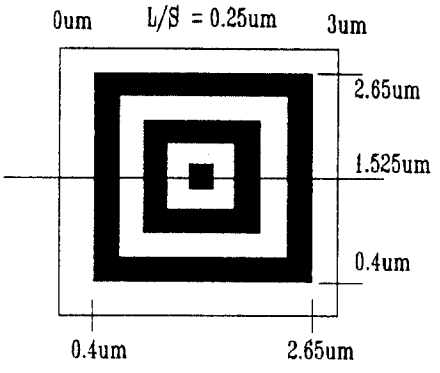
(d)

그림 2. 전자의 가속에너지와 PMMA두께에 따른 EID
Fig. 2. EID for different PMMA thickness and acceleration energy.

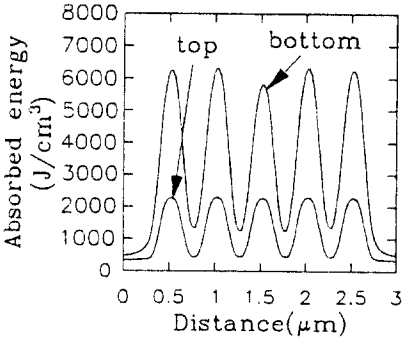
부터는 난수에 따라 θ, ϕ가 결정되어 진행을 하는데, cell들은 정육면체로 구성되어 있으므로 2번째 step부터는 cell의 대각선 방향으로 전자가 진행할 확률이 커진다. 따라서, cell을 진행하는 길이가 길어져 Bethe 에너지 손실식에 의해 그만큼 더 많은 에너지를 cell에 주게 된다. 이 문제는 cell 크기를 줄임으로써 해결된다.

2. 노광모의실험 결과

그림 3은 노광모의실험결과로써 근접효과를 단적으로 보여주는 하나의 예이다. 그림 3 에서 보는바와 같이 근접효과에 의해서 가운데 사각형의 에너지가 가장 작고 그 밖의 사각형이 에너지를 많이 받게 된다. 이러한 영향은 현상모의실험에 영향을 주어 에너지를 많이 받는 부분이 더 빨리 현상된다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 0.25 μm 폭 사각패턴 과 (b)단면 에너지 프로파일
Fig. 3. (a) 0.25 μm rectangular pattern and (b) energy profile.

3. 현상모의실험 결과

그림 4는 노광모의실험의 사각패턴에 대해 시간에 따라 현상된, 3-D 현상 프로파일이다. 현상율로는 뒤에서 설명할 현상율의 측정에서 구한 실험결과의 데이타를 썼다. PMMA의 두께는 4300Å이며, 그림 4에서 보는 바와 같이 근접효과에 의해 에너지를 많이 받은 부분이 더 많이 현상됨을 확인할 수 있다.

(a)

(b)

그림 4. 0.25μm 사각노광 패턴 그림 3(a) 에 대한 3-D 현상 프로파일.
(a) 60초 현상 과 (b) 90초 현상
Fig. 4. 3 dimensional development profile of Fig. 3(a).
(a) 60 sec and (b) 90 sec developed profile

Ⅳ. 실험결과

모의실험과 프로파일을 비교분석하기 위하여 에너지와 현상시간에 대하여 프로파일의 변화를 알아보았다. 실험조건으로는 실리콘 표면에 4300Å PMMA 감광막을 입히고 전자빔으로 노광하였다. 전자빔은 가속전압 30keV, 빔 전류 1nA, 빔 직경 90nm 조건에서 사용하여 도즈량 270-360μC/cm2 변화를 주어 모의실험의 결과와 프로파일을 비교하였다. 또한 현상액은 MIBK와 IPA 를 1:3으로 희석하여 60초, 90초, 120초에서 프로파일의 변화를 측정하였다. 또한 현상률을 측정하기 위하여 각 조건에서의 두께변화를 나노스펙으로 측정하여 계산하였다. 따라서 측정된 값들은 curve fitting하여 시뮬레이션 파라메터로 활용하였다.

1. 현상율 측정

현상율에 대한 식은 Neureuther[10]가 사용한 식을 이용하였다.

$$R(D) = C_m(R_1 + \frac{D}{D_0})^{\alpha} \quad (\text{Å/sec})$$

여기서, $D(\text{J/cm}^3)$ 는 리지스트에 흡수된 에너지, $C_mR_1^{\alpha}$(Å/sec)는 노광 되지 않은 곳의 현상율, D_0는 reference 또는 knee 에너지(logR에 대한 logD 그래프에서 도즈가 낮은 부분과 도즈가 높은 부분의 점근선의 교차점), α는 logR에 대한 logD 그래프에서 도즈가 높은 영역에서 점근선의 기울기를 나타낸다.

실험에서의 측정은 0.2, 0.3, 0.4, 0.5μm L/S 패턴에 대해 도즈를 변화(270, 300, 330, 360μC/cm^2)시켜 노광해서 60초, 90초, 120초로 시간을 변화시켜 현상한 후, 현상된 깊이를 측정해 도즈에 대한 현상율(Å/sec)을 구하며, 도즈(μC/cm^2)를 PMMA에 흡수된 에너지로 바꾸어 주는 것은 노광모의실험을 통해 패턴에 대한 에너지 프로파일을 계산해 현상된 깊이까지의 에너지의 평균값으로 도즈를 바꾸어 준다. 그림 5는 현상율의 측정값과 fitting결과이다.

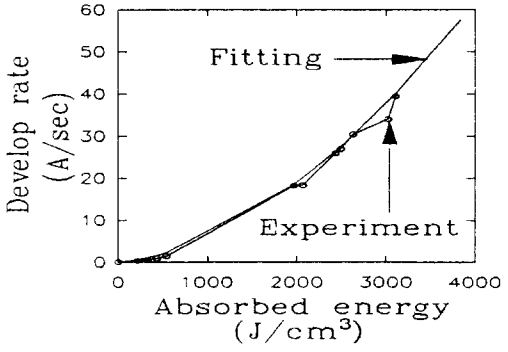
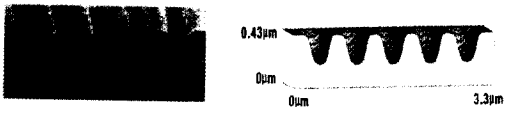


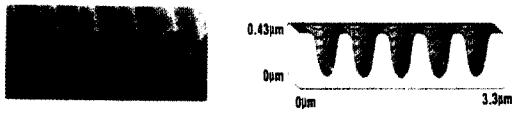
그림 5. 흡수 에너지에 따른 현상
Fig. 5. Development rate for absorbed energy.

2. L/S 패턴에 대한 결과

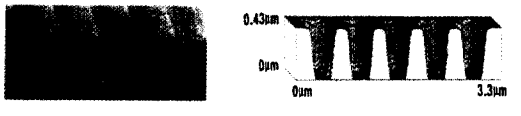
그림 6은 0.3μm L/S패턴의 현상시간 90초에 대해서 도즈에 따른 리지스트 현상 프로파일이며, 그림 7은 0.3μm L/S 패턴, 도즈 270μC/cm^{2}에 대한 현상시간별 리지스트 프로파일이다. PMMA두께는 4300Å이며, 모의실험에서는 4000Å이다. 그림에서 선은 PMMA와 Si의 경계와 선폭을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 90초 현상한 모의실험 프로파일은 실험과 잘 일치하는 경향을 보이나, 그림 7의 120초 현상한 결과는 모의실험이 더 많이 현상되게 나타남을 알 수 있다. 즉, 현상시간이 길어질수록(>90초) 모의실험의 현상이 더 빨리 됨을 알 수 있다. 이것은 그림 5의 현상율 fitting 결과를 보면 알 수 있듯이 에너지가 높은 부분과 낮은 부분은 측정 데이타보다 fitting결과가 훨씬 더 빨리



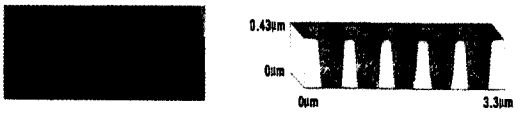
(a) 270 $\mu C/cm^2$



(b) 300 $\mu C/cm^2$



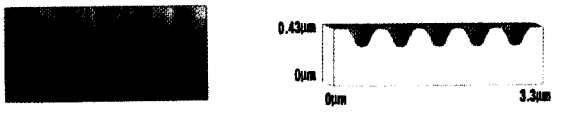
(c) 330 $\mu C/cm^2$



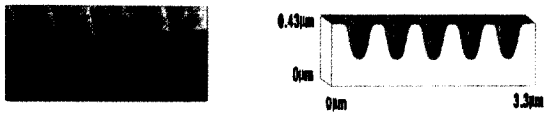
(d) 360 $\mu C/cm^2$

그림 6. 0.3 μm L/S패턴에 대해서 90초 현상한 3차원 리지스트 프로파일이며, 왼쪽은 실험, 오른쪽은 모의실험결과를 나타냄

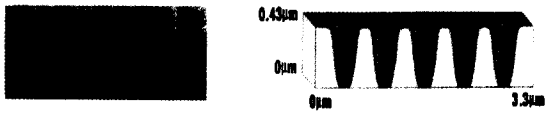
Fig. 6. 90 sec developed profile for 0.3 μm line/space pattern. Left : experimental and right : simulation result



(a) 60초



(b) 90초



(c) 120초

그림 7. 도즈270μC/cm^2, 0.3μm L/S패턴에 대한 현상시간 별 리지스트 프로파일 (왼쪽 : 실험, 오른쪽 : 모의실험)

Fig. 7. The developed profile for 270μC/cm^2, 0.3 μm line/space pattern. Left : experimental and right : simulation result.

현상되도록 되어있다. 즉, 에너지를 많이 받은 리지스트의 bottom부근에서는 아래 설명한 바와 같이 실제 받은 에너지보다 현상이 더디게 진행이 되므로 에너지가 높은 부분에 맞추어 fitting을 하지 않았다. 이것은 Neureuther식이 모든 경우에 적용되지 못한다는 것을 보여준다. 여기서 알 수 있는 것은 리지스트와 현상액, 노광된 선폭, 현상방식에 따라 그것에 맞는 현상율 식을 써야 한다는 것이다. 즉, Neureuther는 실험에서 PMMA2010과 현상액 MIBK:IPA(1:1)을 썼고, 본 실험에서는 PMMA 4%, MIBK:IPA(1:3)을 썼으므로 이에 맞는 식을 써야 한다. 또, 현상하는 방식에 따라 다르겠지만 선폭이 작으면 작을수록, 현상된 깊이가 커지면 커질수록 현상액이 선(space-space사이)에서 순환이 원활히 이루어지지 않으므로 리지스트와 기판의 경계쪽으로 갈수록 에너지를 더 많이 받음에도 불구하고 그것에 맞는 현상속도보다는 느리게 현상이 진행된다. 따라서, 기존에 나와있는 현상율 식을 그대로 쓰는 것보다는 실험조건에 맞는 데이타를 그것에 맞는 현상율 식으로 fitting해 모의실험 데이타로 넣어주면 실험과 잘 일치하는 프로파일이 나올 것이 예상된다.

V. 결 론

모의실험이 가능한 크기를 좌우하는 것으로 가장 큰 요인으로는 몬테카를로 모의실험의 입력인 cell 크기에 달려있다. 즉 cell 크기가 작으면 작을수록 좀더 작은 범위의 모의실험이 가능하지만 CPU시간이 기하급수적으로 증가하고, 전자빔장치 가우 시안 빔의 지름이 제한되어 있는 한 cell 크기를 작게 하는 것은 큰 의미가 없다.

본 모의실험을 통해 패턴이 근접해 있을 때 발생하는 근접효과를 확인하였고, L/S 패턴에 대한 모의실험 결과와 실험을 비교함으로써 리지스트 프로파일을 예측할 수 있었다. 그리고, 리지스트와 현상액에 따라 그에 맞는 현상율 식을 써야 한다는 것을 알았다.

미세패턴(<0.1μm)을 형성하기 위해서는 궁극적으로 전자빔의 노광 pixel 크기와 빔의 지름을 줄여줘야만 하며, 현재와 같은 조건(field 크기:1.6384mm, pixel 크기:50nm, 빔의 지름:90nm)에서 전자빔 장치의 개선없이 software적인 방법으로 미세패턴을 형성한다는 것은 어렵다고 판단된다. 앞으로 위의 모의실험을 통해 interproximity, intraproximity등의 발생정도를 확인

하여, 근접효과 보정 방법을 개발하는 것이 필요하다.

감사의 글

※ 본 연구는 교육부 학술연구 조성과 ETRI 차세대 반도체 기반 기술사업의 연구결과이며, 이 연구에 많은 관심과 도움을 주시는 ETRI 연구원들에게 감사를 드린다. 그리고 노광실험에 도움을 주신 서울대 반도체 공동연구소 기사와 조교에게 감사를 드린다.

참 고 문 헌

[1] David Elliott, "*Microlithography*", Ch.5 Multilayer resist, 1986.

[2] 배용철, "삼층감광막구조를 이용한 전자빔 묘화 기술의 개발", 서울대학교 대학원 공학석사학위 논문, 1994

[3] Norman G. Einspruch et al., "*Beam processing technologies*", Academic Press, Inc., p145, 1989.

[4] C.R.K.Marrian et al., "Low-voltage electron beam lithography with a STM", Appl. Phys. Lett., 56(8), 19, pp.755-757, 1990.

[5] Geraint Owen, "Method for proximity effect correction in electron lithography", J.Vac. Sci. Technol. B 8 (6), pp.1889-1892, 1990.

[6] J.C.Jacob et al., "Proximity Effect in Electron Beam Lithography", J.Vac. Sci. Technol., vol.12, no 6, pp.1271-1275, 1975.

[7] 조광섭, "전자빔 리토그라피의 몬테칼로 전산모사", 서울대학교 반도체공동연구소 보고서, 1990

[8] Kenji Murata "Monte-Carlo Simulation of Electron Scattering in Resist Film/ Substrate Targets", Electron Beam Interaction With Solids(pp,311-329).

[9] Jewett et al., "Line-Profile Resist Development Simulation Techniques", Polymer EngineerIng And Science, vol.17. No. 6, June 1977.

[10] Neureuther, "Electron-Beam Resist Edge Profile Simulation", IEEE Transactions on ectron devices, vol. Ed-26 no.4., April 1979.

저 자 소 개

徐 泰 源(準會員)

1969년 12월 1일생. 1993년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업(B.S) 1995년 2월 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업(M.S). 1995년 3월 ~ LG전자 중앙연구소 ASIC Center 연구원. 주관심분야는 E-beam lithography simulation, 반도체 설계 및 소자 등임

咸 泳 穆(正會員)

1959년 1월 19일생. 1983년 2월 한양대학교 물리학과 졸업(B.S). 1985년 9월 한양대학교 물리학과 대학원 졸업(M.S). 1986년 3월 ~ 현재 서울대학교 대학원 전기공학부 박사과정 및 현대전자 반도체 연구소 책임연구원. 주관심분야는 lithography technology, simulation and modeling 그리고 semiconductor process 등임

全 國 鎭(正會員) 현재 서울대학교 전기공학부 부교수

李 鍾 德(正會員) 현재 서울대학교 전기공학부 정교수