

## 집속이온빔 리소그라피(Focused Ion Beam Lithography)의 노출 및 현상에 대한 몬테칼로 전산 모사

이 현 용\*, 김 민 수, 정 흥 배  
( 광운대학교 전자재료공학과 )

### Monte-Carlo Simulation for Exposure and Development of Focused Ion Beam Lithography

Hyun-Yong Lee, Min-Su Kim, Hong-Bay Chung  
( Department of Electronic Materials Eng. Kwangwoon Univ. )

#### ABSTRACT

Thin amorphous film of a- $Se_{75}Ge_{25}$  acts as a positive resist in ion beam lithography.

Previously, we reported the optical characteristics of amorphous  $Se_{75}Ge_{25}$  thin film by the low-energy ion beam exposure and presented analytically calculated values such as ion range, ion concentration and ion transmission coefficient, etc. As the calculated results of analytical calculation, the energy loss per unit distance by  $Ga^+$  ion is about  $10^3 [keV/\mu m]$  and nearly constant for all energy range.

Especially, the projected range and straggling for 80 [keV]  $Ga^+$  ion energy are  $0.0425 [\mu m]$  and  $0.020 [\mu m]$ , respectively.

Here, we present the results of Monte-Carlo computer simulation of Ga ion scattering, exposure and development in a- $Se_{75}Ge_{25}$  resist film for focused ion beam(FIB) lithography. Monte-Carlo method is based on the simulation of individual particles through their successive collisions with resist atoms. By the summation of the scattering events occurring in a large number  $N(N>10000)$  of simulated trajectories within the resist, the distribution for the range parameters is obtained. Also, the deposited energy density and the development pattern by a Gaussian or a rectangular ion beam exposure can be obtained.

#### 1. 서 론

최근 마이크로소자 개발을 위한 집속이온빔 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 기술은 maskless 이온주입, maskless 고용점 박막제작 및 식각(IBA & D), 이온분석기술 그리고 고분해능을 갖는 집속이온빔 리소그라피(FIBL) 등에 적용이 가능하며, 특히, FIBL 기술은 sub-quarter micrometer 급 소자 개발을 위한 기술로서의 그 중요성이 더욱 크다.

리소그라피 기술의 선두 주자인 팽 리소그라피는 이미 분해능의 한계를 보이고 있으며 다중레지스트(MLR), excimer 레이저 리소그라피 및 PSM(phase shift masking) 등의 응용 기술을 통

해 팔로를 찾고 있으며, 소프트 x-선 리소그라피는 compact storage ring에 의한 synchrotron radiation의 실용화와 더불어 관심이 높아지고 있다.

maskless 공정이 가능한 전자빔 리소그라피의 경우에 비하여 집속 이온빔 리소그라피는 1000Å 보다 훨씬 작은 근접효과(proximity effect)<sup>(1)</sup>, 레지스트의 높은 감도(sensitivity) 그리고 이온경로(ion trajectory)에 대한 거의 일정한 에너지 흡수등의 장점<sup>(2)</sup>이 있으며, 적절한 레지스트의 선택에 따라 분해능(resolution) 및 대비도(contrast)의 향상을 가져올 수 있다.

기존의 폴리머 저항의 유기질 레지스트에 비해 무기질 이온 레지스트로서의 비정질 칼코게나이드 박막은 팽 이온 전자빔에 비해 이온빔에 대하여 감도가 우수<sup>(3)</sup>할 뿐만 아니라 패턴 형성시의 분해능 및 대비도의 값이 현저히 두드러진 특성을 보여 왔다<sup>(4)</sup>. 그러나, 높은 에너지의 이온빔이 기판 위에 형성된 레지스트에 직접 노출되는 경우 기판으로의 이온투과에 의한 기판 훼손이 문제<sup>(5)</sup>가 된다. 이를 최소화하는 방안으로 레지스트의 두께를 이온투사범위 보다 크게하는 방안이 제시되었다.

spin-coated 폴리머의 경우는 공정상 많은 휘발성 용매를 포함하기 때문에 진공상태의 공정한 전자빔 및 이온빔 리소그라피에 대하여 부적합한 특성을 보이는 반면 무기질 레지스트의 경우 특히, 비정질 Se-Ge 박막을 이용하는 경우 전자빔이나 열에 의한 진공증착으로 형성하기 때문에 미세선폭조절이 용이하며 따라서 현재 반도체 공정에서 필수 요건인 vacuum process에 적합하다. 또한 레지스트 변형온도인 유리점전이온도 Tg가 220°C 정도로 높기 때문에 반도체 제조공정상의 열에 의한 열화를 제거할 수 있으며, 고분해능을 얻기에 충분히 dense 하고, 이온정지력이 비교적 크기 때문에 기판으로의 원하지 않은 이온침투에 의한 기판 훼손을 줄일 수 있으며 높은 영상대비도(aspect ratio)를 얻기 위한 효율적인 방법인 얇은영상(shallow imaging) 형성이 가능하다.

앞 선 논문에서 비정질  $Se_{100-x}Ge_x$  ( $10 \leq x \leq 30$ ) 박막 중에서 광학적인 구조 변형을 할 경우에 최대의 화학적 변화를 가지는 a- $Se_{75}Ge_{25}$  와 Ag/a- $Se_{75}Ge_{25}$  박막을 선택하여 그의 기본적인 물성을 고찰<sup>(6)</sup>하고 LMIS  $Ga^+$  이온빔 조사시 발생하는 박막의 이온유기변화를 고찰하였으며 또한,  $Ga^+$ ,  $Ar^+$  및  $Si^{++}$  이온빔 조사시 레지스트의 이온에너지 손실, 이온침투 범위, 이온농도 분포 및 이온투과율에 대한 모델을 설정하고, 컴퓨터 계산을 수행하여 이온 레지스트 매개변수를 추정<sup>(7)</sup>하였다.

이온의 고체내에서의 산란특성은 Monte-Carlo 방법을 이용하여 많은 연구가 있어 왔으며 그동안 잘알려진 프로그램에는 TRIM(transport of ions in matter), PIBER (program for ion beam exposure of resists)등이 있다.

본 연구에서는 집속이온빔 조사에 따른 박막내에서의 주입이온에 의한 산란(scattering), 노출(exposure) 및 현상(development) 특성을 Monte-Carlo 전산모사를 통하여 고찰한다.

## 2. 전산 모사 방법

고체내에서이 이온의 산란 특성과 관련된이 이온침투현상 연구에 적용되어온 방법은 크게 Boltzman Transport Equation (BTE)와 Monte-Carlo(MC) 방법으로 대별된다.

여러 MC 프로그램의 차이는 핵 산란의 취급방법과 target pixel의 형태에 있다. 본 연구에서는 MC 전산모사를 위하여 핵과 전자 충돌에 의한 저지능을 독립적으로 다루며 핵산란에 대한 potential은 Moliere 근사<sup>(8)</sup>를 사용한 TF potential을 이용하고 Bragg 법칙을 적용하여 다중 구성원자 target에 대하여 해석한다. 이때 target 은 x,y,z 방향에 대하여 각각 25, 25, 25[Å] 크기를 갖는 pixel들로 구성시키고 선형분포난수를 impact parameter에 적용하여 산란각을 얻고 이로 부터 연속적 이온들의 trajectories를 구하였다. 이온 및 전자 충돌후 정지된 이온들의 위치 분포는 pixel들로 구성된 삼차원 공간에서 얻을 수 있으며, 이것은 각 pixel에 누적된 이온에 대한 정보로부터 얻기 때문에 step 형태로 주어진다. 이 결과를 앞 논문에서LSS 이론 등을 이용하여 수학적 계산으로 부터 얻은 결과<sup>(7)</sup>인 이온범위,이온 struggling, 이온농도등과 비교하였다. 이러한 입사 이온들은 불연속적 산란과정인 핵 충돌로 target 원자에 에너지를 전달후 다음 핵 충돌 까지는 연속적 전자충돌을 거치면서 에너지를 잃게되며 이때 각 pixel에 주어진 에너지 분산특성으로 부터 실제 Gaussian beam(GB) 또는 rectangular beam(RB)에 의한 노출 특성과 이에 따른 development 결과를 얻을 수 있다.

그림1은 pixel 들로 구성된 target 및 단일 이온 trajectory의 개략도를 보이고 있다.

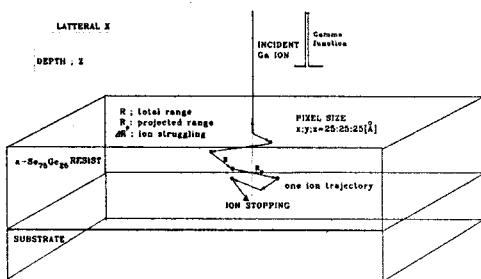


그림1. target 구성 및 단일 이온 trajectory의 개략도

$10^5$  개 이상 이온에 대한 trajectories를 얻으므로 계산의 정밀도를 증가시킬 수 있다. 이때의 이온빔은 delta 함수의 형태이며 Fourier Transformation을 이용하여 이를 실제 분포의 집속이온빔인 GB 또는 RB에 적용하므로 비교적 정확한 집속이온빔 리소그래피 패턴을 얻을 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

그림2는 비정질  $Se_{75}Ge_{25}$  박막의 delta 함수형태의 50[keV], 80[keV]  $Ga^+$  이온에 대한 200 이온 trajectories를 보이고 있다.

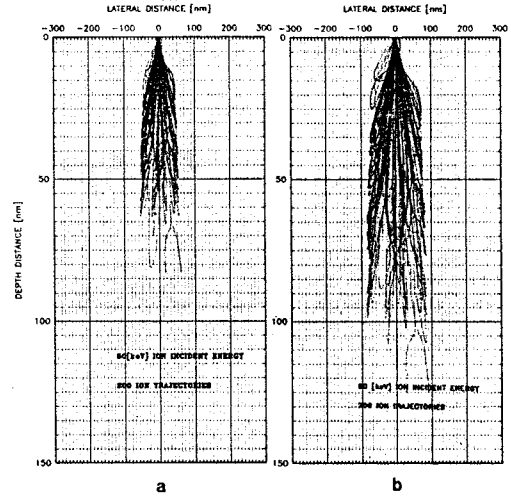


그림2. a- $Se_{75}Ge_{25}$  박막의 200 ion trajectories

그림2로 부터 이온 주입시의 측면으로의 산란 정도를 볼 수 있는데 그 정도가 700[Å] 미만으로 전자 또는 가벼운 이온 주입시의 비에 상당히 작은 값이다. 또한, 80[keV] 입사 에너지에 의한 침투 깊이는 거의 1000[Å] 미만이고 앞선 논문<sup>(7)</sup> 결과에서 이온 투과율이  $10^{-4}$  미만이 되는 최소 두께가 1180[Å] 이었던 것으로 부터 1100~1200[Å]의 레지스트 두께로도 기판 damage를 제거할 수 있을 것으로 생각된다.

각각의 입사 이온은 레지스트의 핵과 전자와의 산란에 의해 그 에너지를 잃고 정지하게되는 데, 이때의 산란은 핵에 의한 elastic scattering과 가스 형태로 취급되는 전자에 의한 inelastic scattering만을 고려하는 것이 일반적이다.

이온과 이온간의 산란을 무시할 경우의 정지 이온 분포를 그림3에 3차원 형태로 나타내었다.

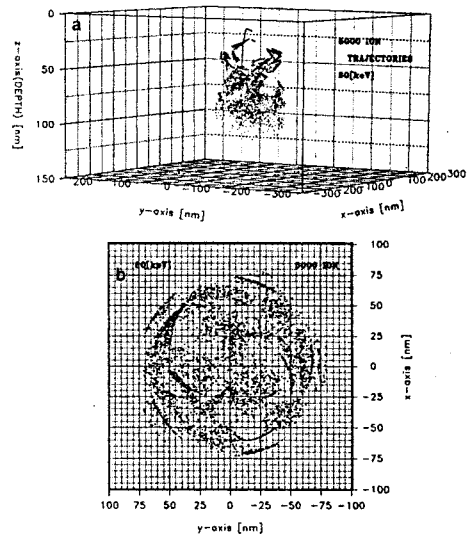


그림3. 5000 ion trajectories에 의한 3차원 농도 분포

80[keV]의 입사에너지를 갖는 5000개의 이온 trajectoris에 의한 결과로 500[Å] 미만의 깊이에서 산란 각도 비교적 크고 이로 인하여 이온의 측면 분포가 두드러지며 그 이상에서는 좁은 공간에서 매우 불규칙한 분포를 갖는다. 또한 그림3(b)는 z 축 방향에서 관찰한 그림으로 완전한 원뿔형태를 갖는 것을 알 수 있다.

그림4는 측면 방향 cell 당 깊이에 따른 이온 농도 분포를 나타내고 있다.

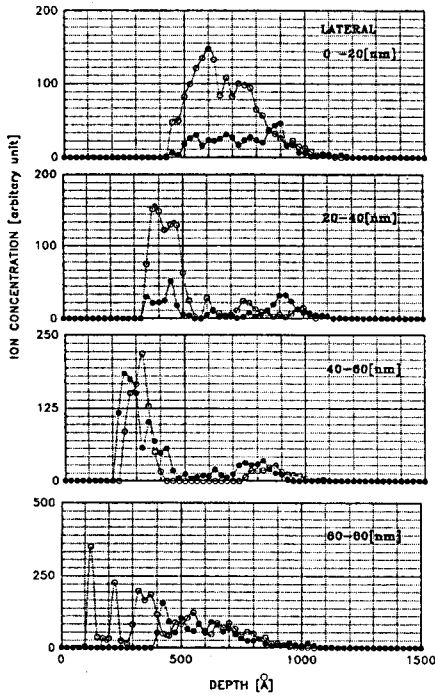


그림4. 측면 방향 cell 당 깊이에 따른 이온 농도 분포

그림에서 보는 바와 같이 중심으로 갈수록 깊이에 따른 이온 농도 분포는 점점 표면에 집중됨을 알 수 있으며 측면방향 20~60[nm]의 이온 농도 분포의 peak점이 이온 값(8)으로 구한 projected range인 Rp와 유사하였으며 0~40[nm]의 측면에서 1000[Å]의 깊이 이상을 침투한 이온을 발견할 수 있다.

그림5는  $10^{15}/\text{cm}^2$  ion dose를 갖는 (a)50,(b)80,(c)100[keV] 이온빔 조사시 깊이에 따른 이온 농도 분포로 LSS 이론을 기초로 하여 구한 결과와 Monte-Carlo 계산 결과를 비교하였다.

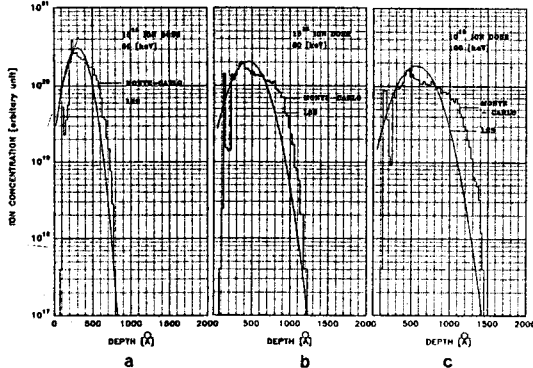


그림5. 입사에너지 함수로서 깊이에 따른 이온 농도 분포  
(a) 50[keV] (b) 80[keV] (c) 100[keV]

MC 결과는 delta 함수 형태의 빔을 고려한 것으로 약간의 차이가 있다. 특히 LSS 결과는 좌우 대칭의 완전한 Gaussian 분포를 나타내는 반면 MC 결과는 비대칭 positive-Pearson 분포를 갖는 것을 알 수 있다.

그림6은 delta 함수 형태의 이온빔에 의한 레지스트에 흡수된 에너지로 전자 정지력 성분(a), 핵 정지력 성분(b) 그리고 전체 흡수에너지(c)로 구분하여 나타내었다.

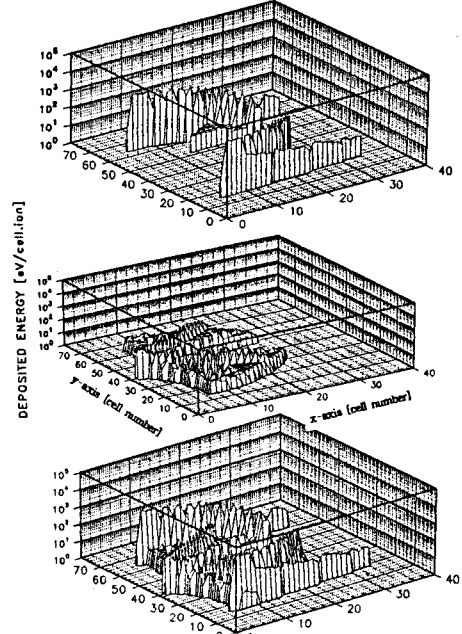


그림6. delta 함수형태의 빔조사에 의한 레지스트에 흡수된 3차원 흡수에너지 분포

(a) electron stopping (b) nuclear stopping  
(c) total stopping

그림7은 beam diameter가 0.2[μm]인 Gaussian beam 조사시의  $10^5$  이온에 의해 규격화된 에너지 밀도를 나타내었다.

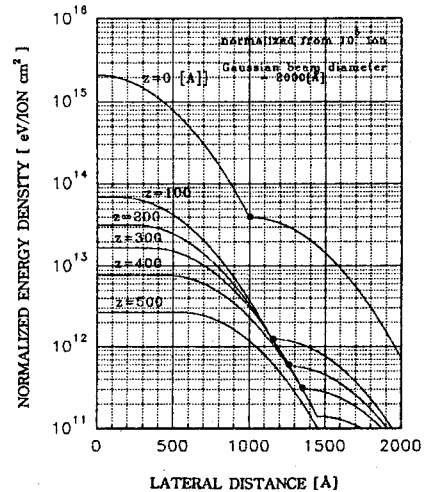


그림7. Gaussian beam 노출에 의한 규격화된 에너지 밀도  
흡수 에너지 형태는 모두 불연속적인 point를 가지며 깊이가

증가함에 따라 이 point가 점차 측면방향으로 증가하였으나 표면( $z=0$ )에서는 point 값이 빔의 경계와 일치하였다. 특히 빔의 형태에 따라 흡수에너지 밀도는 강한 의존성을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 집속이온빔 조사에 따른 박막내에서의 주입이온에 의한 산란(scattering), 노출(exposure) 및 현상(development) 특성을 Monte-Carlo 전산모사를 통하여 고찰하였다. 이 결과는 Focused Ion Beam Lithography 뿐아니라 집속이온빔 관련 기술에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) R. Speidel and V. Behringer, Proceedings of Microcircuit Engineering, RWTH Aachen, Germany (1979)
- (2) H. Rysel, Adv. Electron. Phys., 58, p191, (1982)
- (3) K. Balasubramanyam, L. Karapiperis and C.A. Lee, "An Inorganic Resist for Ion Beam Microfabrication", J. Vac. Sci. & Technol., 19, p18, (1981)
- (4) S. Takahashi, M. Ohashi and R. Ito, "Sub-100nm Pattern Formation using a Novel Lithography with  $\text{SiN}_x$  Resist by Focused Ion Beam Exposure and Dry-Etching Development", J. Vac. Sci. Technol., B11(2), p268 (1993)
- (5) J.S. Huh, M.I. Shepard and J. Melngailis, "Focused Ion Beam Lithography", J. Vac. Sci. Technol., B9(1), JAN/JAN/FEB, p173 (1991)
- (6) 유희관, 허훈, 정홍배, "A Study on the Photoinduced Optical Effects of a-SeGe Thin Films", 대한전기학회지, 36(2), p50 (1987)
- (7) 이현용, 모연한, 정홍배, "The Optical Characteristics of Amorphous  $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$  Thin Film by the Low-Energy Ion Beam Exposure", 전기전자재료학회지 Vol.7, No.2, March (1994)
- (8) 이현용, 정홍배, "An Analysis of the Ion Penetration Phenomena in Amorphous  $\text{Se}_{75}\text{Ge}_{25}$  Thin Film", 전기전자재료학회지 SEPT. (1994)
- (9) G. Moliere, Z. Naturl., 2a, 133 (1947)