

## Monte Carlo 수치해석법을 이용한 PMMA resist에서의 저 에너지 전자빔 투과 깊이에 관한 연구

안승준<sup>1\*</sup>, 안성준<sup>2</sup>, 김호섭<sup>1</sup>

### Research on the penetration depth of low-energy electron beam in the PMMA-resist film using Monte Carlo numerical analysis

Seungjoon Ahn<sup>1\*</sup>, Seong Joon Ahn<sup>2</sup> and Ho Seob Kim<sup>1</sup>

**요 약** 반도체 소자 제작에 있어서 회로의 pattern 형성에 이용하는 차세대 lithography 공정 기술을 위해서 전자빔 lithography 공정 기술 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Gauss 해석법과 Monte Carlo의 수치해석법을 사용하여 두께 100 nm의 PMMA (poly-methyl-methacrylate) resist에 전자  $1 \times 10^4$ 개를 입사시키고, 입사 전자빔 에너지에 따른 PMMA 내에서의 투과 깊이를 비교하였다. 전자빔 에너지의 크기는 100eV, 300eV, 500eV, 700eV, 그리고 1000eV에 대하여 simulation을 실시하였다.

**Abstract** There has been steady effort for the development of the electron-beam lithography technologies for the circuit patterning of the future semiconductor devices. In this study, we have performed a Monte-Carlo simulation where  $1 \times 10^4$  electrons with various kinetic energies (100eV, 300eV, 500eV, 700eV, and 1000eV) were shot into polymethyl methacrylate(PMMA) resist of 100-nm thickness. The penetration depth of each electron beam in the resist layer were analyzed using Gaussian analysis method.

**Key words** : Monte Carlo Simulation, PMMA Resist, Electron-Beam Energy, Penetration Depth, Electron-Beam Lithography

### 1. 서론

고 집적 반도체 소자는 컴퓨터의 CPU, 자동차의 전자 제어 소자, 휴대용 통신기기 및 산업 전반의 IT 장비들의 핵심 부품으로 사용되고 있다. 반도체 소자는 chemical vapor deposition(CVD), cleaning & wet etching, dry etching, lithography 등과 같은 기본 공정을 통하여 제작된다. 소자의 집적도가 높아짐에 따라 소자 제작에 있어서 가장 결정적인 기술은 lithography 기술이다.

Photo lithography 기술은 실리콘 웨이퍼 위에 박막/감광제(PR : photo resist)를 도포한 다음 형성하고자 하는 pattern이 그려진 mask를 통해서 빛을 조사시켜 원하는 pattern을 형성하는 기술이다.

현재 반도체 소자의 제조는 다색 인쇄 공정처럼 여러

종류의 mask와 반복적인 노광공정을 필요로 하기 때문에 노광시간이 짧고 throughput이 높은 photo lithography 기술을 사용하고 있다.

Photo lithography 기술에 의한 patterning의 선폭은 광원의 파장에 비례하고 수치구경(NA : numerical aperture)에 반비례 한다[1]. 일반적으로 pattern의 선폭이 100nm까지는 파장이 365nm인 수은등의 i-line [2, 3]을 사용하여 왔으며 100nm 이하의 미세 선폭의 patterning에 대해서는 파장이 248nm인 KrF excimer 레이저[4]와 193nm의 ArF excimer 레이저[5]가 사용되고 있지만 20nm 이하의 더 미세한 pattern 형성을 위해서는 파장이 더 짧은 광원을 사용해야 하기 때문에 현재 ~200nm급의 자외선(UV : ultra-violet)을 광원으로 사용하는 photo lithography 기술에는 한계가 있다.

반도체 분야에서는 차세대 lithography 기술로서 극자외선(EUV : extremely ultra-violet) lithography[6, 7]와 전자빔 lithography 기술(EPL : electron-beam projection

<sup>1</sup>선문대학교 자연과학대학 신소재학과

<sup>2</sup>선문대학교 공과대학 정보통신공학부

\*교신저자: 안승준(sjan@sunmoon.ac.kr)

lithography, EBDW : electron-beam direct write)[8, 9]을 가장 유력한 기술로 예측하고 있다. 극자외선 lithography 기술은 메모리 소자의 대량생산에 초점을 두고 개발을 하는 반면, 전자빔 lithography 기술은 소량의 다품종 소자 생산을 위한 기술에 역점을 두고 있다. 최근에 이르러 전자빔을 이용하여 mask 없이 미세한 pattern을 직접 형성하는 mask-less 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[10].

전자빔 lithography 기술은 선폭이 10nm 이하인 고분해능의 미세한 patterning이 가능할 뿐만 아니라 mask를 사용하지 않기 때문에 mask 제작비용을 절감할 수 있으며 회로 설계에 대한 유연성도 있다. 그러나 전자빔 lithography 기술은 photo lithography 기술보다 patterning 시간이 길고 throughput이 낮다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 멀티빔(multi beam) 구조의 초소형 전자칼럼(micro-column)[11]을 사용함으로써 throughput을 개선하고자 하였다. 일반적으로 전자빔 lithography 기술은 고 에너지(10~100keV)에서 사용되지만 저 에너지(1keV 이하)를 사용하는 초소형 전자칼럼 lithography 기술은 고 에너지를 사용하는 일반적인 전자빔 lithography 기술과 비교해도 전자빔의 산란에 의한 근접효과(proximity effect)의 영향을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 pattern의 해상도 저하를 막을 수 있다. 또 동작하는 에너지가 낮기 때문에 시료의 손상도도 적고, 에너지 효율이 높아서 멀티빔 구조에서의 적용이 용이하다.

지금까지 일반적인 전자빔 lithography 기술에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만 저 에너지에서의 전자빔 lithography 기술 연구는 시작 단계에 있다. 저 에너지의 전자빔은 고 에너지의 전자빔과 비교하여 볼 때, resist에 입사된 전자들은 매우 얇은 두께만을 투과하게 된다. 따라서 반도체 공정에서 저 에너지 전자빔 lithography 기술을 사용하기 위해서는 전자빔 에너지의 변화에 따른 PMMA resist에서의 투과 깊이에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 Monte Carlo 수치해석법을 이용하여 여러 가지 입사 전자빔 에너지에 대하여 PMMA resist 내에서의 입사 전자의 투과 깊이를 비교 분석함으로써 효과적인 저 에너지 전자빔 lithography 기술이 수행될 수 있는 새로운 tool을 제시하였다.

## 2. Monte Carlo 방법을 이용한 수치해석

전자빔의 조사농도(dose concentration)는 PMMA resist pattern에 영향을 미치는 중요한 인자(factor)로서 단위면적당( $cm^2$ ) 전하량( $\mu C$ )으로 정의된다. 일반적으로

전자빔의 조사농도가 클수록 전자빔의 산란이 크고 투과 깊이가 깊어진다. 본 연구에서는 Gauss 해석법과 Monte Carlo의 수치해석적 방법을 통하여 PMMA resist patterning에 있어서 최적화된 전자빔의 조사농도를 예측함으로써 효과적인 전자빔 lithography를 수행할 수 있도록 실험 인자를 선택하였다. 먼저 PMMA resist의 두께는 100nm로 하였으며 PMMA resist에 전자를  $1 \times 10^4$ 개 조사하여 전자빔의 입사 에너지에 따른 전자의 투과 깊이를 관찰하였다. 전자빔의 입사 에너지는 100eV, 300eV, 500eV, 700eV, 그리고 1000eV이고 각각의 입사 에너지에 대하여 5번씩 simulation을 실시하였다.

그림 1은 Monte Carlo 수치해석법을 이용하여, 입사 전자빔 에너지가 300eV, 500eV인 전자,  $1 \times 10^4$ 개를 조사시켰을 때 PMMA resist 내에서의 전자궤적(trajjectory)을 보여 주고 있다. 그림 2는 전자빔 에너지가 500eV인 조건에서 Monte Carlo 수치해석법을 실시하여 얻은 전자궤적 data를 근거로 하여 PMMA resist의 두께를 일정한 구간으로 나눈 다음, 각각의 구간까지 입사된 전자가 몇 개 존재하는지를 헤아려 투과된 전자의 분포를 그린 그래프이다. 입사된 전자 중에는 PMMA resist 내에서 후방 산란을 하는 전자도 있지만 전방 산란을 반복한 다음 후방 산란을 하는 전자도 있다. PMMA resist 내에서 final point에 있는 전자만을 헤아려서는 정확한 투과 깊이를 관찰할 수가 없다. 정확한 투과 깊이를 관찰하기 위해서 입사 전자가 PMMA resist 내에서 산란된 point와 final point에 있는 전자를 모두 관찰의 대상으로 하였다.

각각의 전자빔 입사 에너지에 대하여 얻어진 결과를 정량화를 위하여 Gauss 해석법을 이용하여 입사 전자의 투과 깊이를 비교하였다. PMMA resist 내에 존재하는 전자들의 분포는 그림 3과 같이 Gaussian 형태의 분포를 가진다. Gaussian 형태의 투과 깊이를 다음과 같이 정의하였다.

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}}$$

$$\text{투과 깊이} = 2 \times w_1 + x_c$$

여기서  $w_1$ ,  $x_c$ 의 값은 각각 Gaussian 분포함수의 폭과 중심값이다.

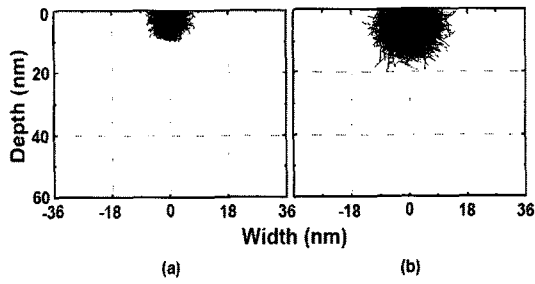


그림 1. Monte Carlo 수치해석법을 이용한 입사 전자빔 에너지 (a) 300eV, (b) 500eV인 전자  $1 \times 10^4$ 개 조사시켰을 때 PMMA resist 내에서의 전자분포.

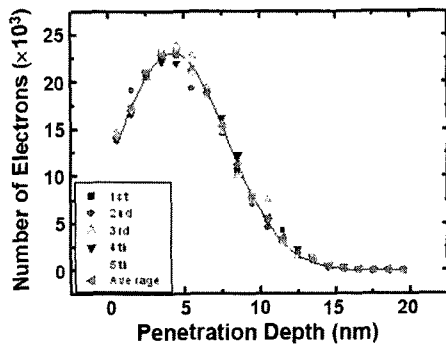


그림 2. PMMA resist의 투과 깊이에 대한 전자의 분포곡선(입사 전자빔 에너지 : 500eV).

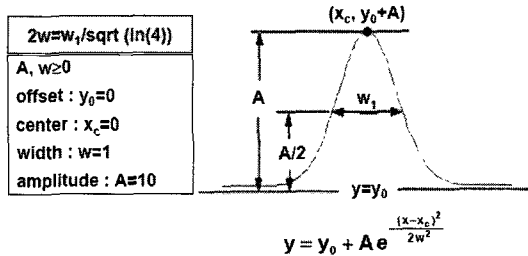


그림 3. Gauss 해석법을 위한 Gaussian 분포함수의 정의

Gaussian 분포함수의 중심값은 PMMA resist 내에 입사 전자의 개수가 가장 많이 존재하는 투과 깊이를 의미한다. PMMA resist 내에서 입사 전자의 투과 깊이는 그림 1에서 보는 바와 같이 전자의 산란궤적 중에서 가장 깊은 투과 깊이와 같은 값이 되도록 정의하였다. 수치해석의 결과로 Gaussian 분포함수의 폭과 중심값은 8nm, 5nm로서 투과 깊이는 ~20nm로 계산된다. 이는 전자빔의 에너지가 500eV인 조건에서 Monte Carlo 수치해석법을 실시하여 얻은 결과(그림 1 참조)와 잘 일치함을 알 수 있다.

### 3. PMMA에 대한 저 에너지 전자빔의 투과 깊이의 특성

그림 4는 여러 가지 전자빔 입사 에너지에 대하여 Monte Carlo 수치해석법과 Gauss 해석법을 이용하여 PMMA resist 내에서의 계산된 투과 깊이와 전자빔 에너지에 대한 관계를 나타낸 그래프이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 전자빔 에너지가 100eV, 300eV, 500eV, 700eV, 그리고 1000eV일 때, 약 3nm, 10nm, 19nm, 30nm, 그리고 50nm 정도까지 전자가 PMMA resist 속으로 투과하는 것을 알 수 있다. 전자빔 에너지의 값이 커지면 커질수록 투과 깊이의 값도 커질 뿐 아니라 전자빔 에너지 값에 따른 투과 깊이의 변화율이 선형적으로 증가하는 게 아니라 지수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

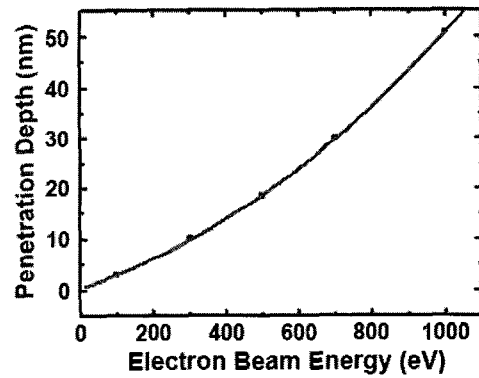


그림 4. Monte Carlo 수치해석법과 Gauss 해석법을 이용하여 계산된 PMMA resist 내에서의 투과 깊이와 전자빔 에너지에 대한 상관관계.

일반적으로 전자빔을 조사한 다음 현상된 PMMA resist pattern의 깊이는 전자빔의 에너지와 조사농도에 의존하지만 조사농도보다 전자빔의 입사 에너지에 더 민감하게 반응한다.

조사하는 전자빔 에너지를 일정하게 유지하고 전자빔의 조사농도를 변화시킬지라도 PMMA resist pattern의 깊이 편차는 2~4nm 정도 인 것을 반복적인 실험을 통하여 관찰하였다. 실험에서 500eV의 전자빔 에너지에 대하여 전자빔의 조사농도를 변화시킬 경우 PMMA resist pattern의 깊이는 18~22nm 임을 알 수 있었다[12]. 이는 본 연구에서 Monte Carlo 수치해석법을 통하여 얻은 19nm의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

따라서 전자빔 에너지가 500eV인 조건에서 PMMA resist는 19nm가 현상되므로 박막의 patterning을 하기 위해서는 PMMA resist를 19nm 이하로 도포하여

lithography를 하는 것이 바람직할 것이다. 실험결과와 수치해석을 통하여 얻은 결과를 비교해 볼 때, 본 연구에서 정의한 투과 깊이와 전자분포의 Gaussian 해석은 적절하다고 판단되며 이러한 수치해석 tool을 이용하면 실험적인 방법을 통하지 않고 최적화된 전자빔의 에너지, 조사 농도를 예측함으로써 적절한 PMMA resist의 두께를 선택하여 효과적인 전자빔 lithography를 수행할 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

최근에 이르러 반도체 소자 제작에 있어서 회로 pattern 형성에 이용되는 차세대 lithography 공정 기술로서 전자빔 lithography 공정 기술이 연구되고 있다. 본 연구에서는 Monte Carlo 방법에 의한 수치해석과 Gaussian 해석법을 이용하여 전자빔 에너지가 100eV, 300eV, 500eV, 700eV, 1000eV인 입사 전자에 대하여 PMMA resist 내에서의 투과 깊이를 분석함으로써 반도체 공정에서의 저 에너지 전자빔 lithography 공정을 수행할 수 있는 기본적인 tool을 마련하였다.

전자빔 에너지 100eV, 300eV, 500eV, 700eV, 1000 eV에서의 PMMA resist patterning의 투과 깊이는 각각 약 3nm, 10nm, 19nm, 30nm, 그리고 50nm 이었으며 이러한 simulation 결과는 실험적 방법으로 PMMA resist를 도포/조사/현상 하여 patterning한 깊이를 측정한 결과[12]와 잘 일치하였다. 이 결과로부터 고 에너지 전자빔 lithography와 비교하여 resist 내에서의 투과 깊이는 얇고, etching이나 금속 증착 등을 이용하여 pattern transfer 하기 위해서는 저 에너지 전자빔 (1000eV 이하)의 경우, 적어도 50nm 이하의 두께로 PMMA resist를 도포하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

[1] R.A. Lawes, "Future trends in high-resolution lithography", Applied Surface Science, Vol. 154-155, pp. 519-526, 2000. 2.  
 [2] B. Martin, "Sub-half-micron contact holes by I-line lithography using attenuated phase shift reticles", Microelectronics Journal, Vol. 28, Issue 2, pp. 10-17, 1997. 2.

[3] V. Van Driessche, J. Finders, A. Tritchkov, K. Ronse, L. Van den hove, P. Tzviakov, "Feasibility of 250 nm gate patterning using i-line with OPC", Microelectronic Engineering, Vol. 41/42, pp. 111-116, 1998. 1.  
 [4] C.T. Pan, "Selective electroless copper plating micro-coil assisted by 248 nm excimer laser", Microelectronic Engineering, Vol. 71, pp. 242-251, 2004. 3.  
 [5] J.H. Lee, K.D. Ahn, I. Cho, "Novel multi-alicyclic polymers for enhancing plasma etch resistance in 193 nm lithography", Polymer Communication, Vol. 42, pp. 1757-1761, 2001. 4.  
 [6] T.E. Madey, N.S. Faradzhev, B.V. Yakshinskiy, N.V. Edwards, "Surface phenomena related to mirror degradation in extreme ultraviolet (EUV) lithography", Applied Surface Science, Vol. 253, pp. 1691-1708, 2006. 8.  
 [7] K. Kemp, S. Wurm, "EUV lithography", Comptes Rendus Physique, Vol. 7, pp. 875-886, 2006. 12.  
 [8] U. Weidenmueller, P. Hahmann, L. Pain, M. Jurdit, D. Henry, Y. Laplanche, S. Manakli, J. Todeschini, "Critical dimension adapted alignment for EBDW", Microelectronic Engineering, Vol. 78-79, pp. 16-21, 2005. 1.  
 [9] L. Pain, B. Icard, S. Manakli, J. Todeschini, B. Minghetti, V. Wang, D. Henry, "Transitioning of direct e-beam write technology from research and development into production flow", Microelectronic Engineering, Vol. 83, pp. 749-753, 2006. 2.  
 [10] T. Djenizian, B. Petite, L. Santinacci, P. Schmuki, "Electron-beam induced carbon deposition used as a mask for cadmium sulfide deposition on Si(100)", Electrochimica Acta, Vol. 47, pp. 891-897, 2001. 8.  
 [11] H.S. Kim, Y.C. Kim, D.W. Kim, S.J. Ahn, Y. Jang, H.W. Kim, D.J. Seong, K.W. Park, S.S. Park, B.J. Kim, "Low energy electron beam microcolumn lithography", Microelectronic Engineering, Vol. 83, pp. 962-967, 2006. 2.  
 [12] H.S. Kim, S. Ahn, D.W. Kim, Y.C. Kim, H.W. Kim, S.J. Ahn, "Sub-60-nm Lithography Patterns by Low-Energy Microcolumn Lithography", Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, pp. S712-S715, 2006. 12.

안 승 준(Seungjoon Ahn)

[정회원]



- 1985년 2월 : 경북대학교 자연과학대학 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1989년 2월 ~ 1997년 2월 : 삼성전자 반도체연구소 선임연구원

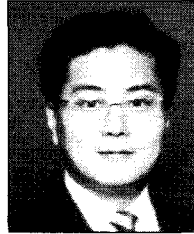
- 1993년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 자연과학대학 신소재학과 부교수

<관심분야>

반도체 공정 및 장비기술, 레이저 annealing, 레이저 미세가공, 전자빔 기술, 접지기술

김 호 섭(Ho Seob Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 인하대학교 물리학과(이학사)
- 1986년 12월 : 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학석사)
- 1992년 5월 : 미국 미조리주립대학교 물리학과(이학박사)
- 1996년 10월 : IBM Watson Research Center 연구원

- 1999년 2월 : Etec System, Inc 전자빔 리소그래피 설계/제작 팀장

- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 신소재학과 교수

<관심분야>

전자빔 리소그래피, Microcolumn, Multi microcolumn, 전자빔 기술, 반도체 장비

안 성 준(Seong Joon Ahn)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1992년 9월 : 삼성전자 반도체연구소 선임연구원

- 1996년 5월 : 한전전력연구원 선임연구원

- 현재 2002년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학부 부교수

<관심분야>

반도체 공정, 광섬유 통신 및 센서, 전자빔 기술, 레이저 미세가공, 접지기술