

저 에너지 초소형 전자칼럼 리소그래피를 이용한 SiO₂ 박막의 Pattern 제작에 관한 연구

요시모토 다카토시 · 김호섭 · 김대욱 · 안승준*

선문대학교 자연과학대학 신소재과학과/차세대반도체연구소, 충남 아산시 당정면 갈산리 100, 336-708

(2007년 5월 17일 받음, 2007년 8월 10일 최종본 받음)

반도체의 고 집적회로를 형성하기 위하여 주로 이용하고 있는 광 리소그래피 기술을 대신하여 사용할 수 있는 차세대 리소그래피 기술로 전자빔 리소그래피 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 초소형 전자칼럼을 이용하여 전자빔 에너지와 조사농도에 따른 pattern 두께의 의존성을 조사하였으며 두께가 100 nm인 SiO₂ 박막의 patterning을 통하여 SiO₂ 박막에 대한 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정의 가능성을 입증하였다.

주제어 : SiO₂ 박막의 patterning, 저 에너지 리소그래피, 초소형 전자칼럼, PMMA resist

I. 서 론

최근에 반도체 산업에서 고집적 회로의 pattern을 형성하기 위해서 널리 사용되고 있는 광 리소그래피를 대체할 수 있는 차세대 리소그래피 기술로서 ArF excimer 레이저보다 파장이 더 짧은 extreme ultraviolet(EUV) wave[1]와 전자빔을 이용한 리소그래피의 연구[2, 3]가 진행되고 있다.

전자빔 리소그래피는 10 nm 이하의 고 분해능(high resolution)의 미세한 patterning이 가능할 뿐만 아니라 광 리소그래피 공정에서처럼 여러 종류의 마스크를 사용하지 않고 미세한 pattern을 직접 형성하는 mask less 방식으로 patterning을 하기 때문에 mask를 준비하는 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 전자빔 리소그래피는 노광시간이 길고, 광 리소그래피와 비교하여 throughput이 낮은 단점 때문에 반도체 소자를 양산하는 리소그래피 공정에서는 사용되지 못하고 광 리소그래피를 위한 mask 제작에 전자빔을 사용해 왔다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 IBM Watson 연구소의 P. Chang[4, 5]은 초소형 전자칼럼의 멀티 구조[6, 7]를 이용하여 현재 사용되고 있는 고 에너지 전자빔 리소그래피 기술보다 더 높은 throughput을 얻는데 성공하였다[8]. 초소형 전자칼럼은 전자빔 과학의 기본적인 개념을 이용한 전자렌즈로 구성되어 기존의 전자빔 장치보다 매우 간단한 구조를 이루고 있다. 초소형 전자칼럼은 전자방출원, 마이크로렌즈, deflector, Einzel 렌즈로 이루어져 있으며 기존의 대형의 전자빔보다 저 전압을 인가하여도 고 밀도의 전자빔(high density current)을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그 중에서도 초소형 전자칼럼의 가장 큰 장점은 전자빔 장치의 소형화로 멀티 전자빔

구조가 가능하고, mask 없이 웨이퍼에 직접 pattern을 그릴 수 있는 멀티 전자빔 리소그래피로도 적용이 가능하다는 것이다.

일반적으로 전자빔 리소그래피는 고 에너지(10~100 keV)에서 사용되는데, 저 에너지(~1 keV)에서 사용하는 초소형 전자칼럼을 이용한 전자빔 리소그래피는 고 에너지를 사용하는 경우에 비교하여 resist 내에서의 전자빔의 산란에 의한 근접효과(proximity effect)의 영향을 배제할 수 있기 때문에 pattern의 해상도 저하를 막을 수 있다. 또 초소형 전자칼럼은 동작 에너지가 낮기 때문에 시료의 손상도도 적고, 크기가 작아서 생산성을 향상시키기 위하여 멀티 구조로의 응용이 용이하다.

저 에너지 리소그래피는 resist에서 후방 산란이 적은 점과 resist에 반응이 민감하기 때문에 미세 pattern을 이용한 device 연구에 적합한 리소그래피 기술로 평가된다. 그러나 일반적인 전자빔 리소그래피가 10~100 keV의 고 에너지를 사용하는 것과는 달리 초소형 전자칼럼을 이용한 전자빔 리소그래피는 저 에너지를 사용하므로 PMMA resist의 두께, 전자빔 에너지, 전자빔 조사농도(dose concentration) 등 이에 알맞은 실험조건이 필요하다.

본 연구에서는 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정을 위하여 전자빔 에너지와 조사농도에 따른 현상된 PMMA resist 두께 의존성을 관찰하고 저 에너지 전자빔을 이용하여 반도체 공정에 널리 사용되고 있는 SiO₂ 박막의 pattern을 형성함으로써 SiO₂ 박막에 대한 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정의 가능성을 입증하고자 하였다.

II. 초소형 전자빔 리소그래피를 위한 시스템 제작

본 연구에서는 저 에너지 전자빔 pattern을 위하여 single

*Tel: (041) 230-2261, E-mail: sjan@sunmmon.ac.kr

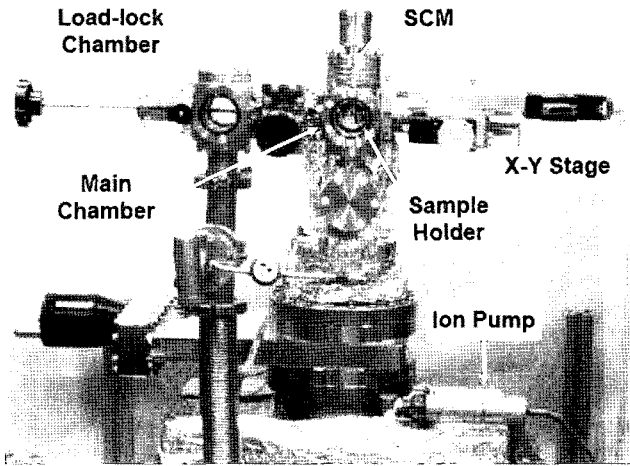


Fig. 1. Low energy microcolumn lithography system.

column module(SCM)을 기본으로 하는 전자빔 리소그래피 시스템을 설계·제작하였다. 저 에너지 리소그래피 시스템은 Fig. 1과 같이 두 개의 2.75" chamber(main chamber와 load-lock chamber)로 구성되어 있다. Main chamber에는 단일 전자빔 구조의 SCM, sample holder, 그리고 x-y stage로 구성되어 있다. Main chamber의 진공도는 ion pump로 조절 되도록 설계·제작되었으며 기본 진공은 1×10^{-9} Torr이다. Load-lock chamber는 main chamber의 진공을 항상 일정하게 유지하며 sample을 교환하는 보조 chamber로서 turbo molecular pump에 연결되어 있다.

본 시스템에 장착된 초소형 전자빔은 고 휘도와 저 에너지 전자방출을 위하여 cold field emitter(CFE)를 사용하였으며, tip 지름은 대략 20~50 nm가 되도록 제작하였다. 전자렌즈의 limiting aperture[9, 10]는 직경이 수 μm 인 것이 일반적으로 사용되고 있으나, 본 연구에서는 pattern의 분해능과 저 에너지 리소그래피의 가능성을 평가하는데 역점을 두기 위하여 직경이 100 μm 인 전자렌즈를 사용하여 sample에 많은 전자빔이 도달하도록 설계·제작하였다.

III. 저 에너지 리소그래피를 이용한 SiO₂ 박막의 Patterning

전자빔 조사농도는 PMMA resist pattern에 영향을 미치는 중요한 인자(factor)로서 단위면적당(cm^2) 전하량(μC)으로 정의된다. Fig. 2는 전자빔 조사에 있어서 조사면적의 정의와 조사량 계산에 필요한 parameter를 나타낸 것으로 center-to-center는 조사된 전자빔 spot의 center와 center 사이의 거리이며 line spacing은 조사된 전자빔 line 사이의 거리를 표시한다. 여기서 조사시간(exposure time)은 한 spot에 전자빔을

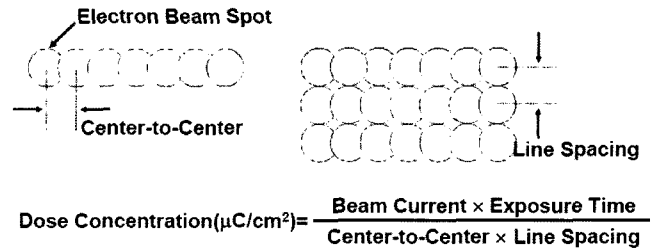


Fig. 2. Exposure area in the electron beam exposure and definition of the dose concentration.

조사하는 시간이다. 일반적으로 전자빔 조사농도가 클수록 전자빔의 산란이 크고 투과깊이가 깊어진다. 전자빔 조사농도에 따른 PMMA resist pattern 특성을 관찰하기 위하여 전자빔 에너지를 300 eV, 400 eV, 500 eV, 600 eV로 변화시켜 약 $450 \times 450 \mu\text{m}^2$ 크기의 pattern을 노광/현상하였다.

현상 후 PMMA resist pattern의 깊이를 측정함으로써 전자빔 조사농도 변화에 따른 전자빔의 투과 깊이를 측정된 결과 전자빔 조사농도가 $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이하에서 현상된 PMMA resist pattern의 깊이는 전자빔의 에너지가 300 eV일 때 약 10~13 nm, 400 eV일 때 약 12~15 nm, 500 eV일 때 약 15~18 nm, 그리고 600 eV일 때 약 18~21 nm임을 알 수 있었다.

전자빔의 에너지가 600 eV이고, 조사농도가 $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이하면 PMMA resist는 약 ~20 nm 현상되므로 SiO₂ 박막을 patterning을 하기 위해서 PMMA resist를 20 nm 이하로 coating하고 전자빔 에너지를 600 eV로 조사한다면 적절한 조사 조건으로 예상되나 전자빔 에너지가 낮을수록 전자빔의 산란에 의한 근접효과의 영향을 배제할 수 있기 때문에 전자빔의 에너지와 조사농도는 500 eV, $75 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 실험조건을 확립하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 실시한 저 에너지 초소형 전자빔 리소그래피를 이용한 SiO₂ 박막의 etching 공정을 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저 sample을 제작하기 위하여 실리콘 웨이퍼를 acetone(10 min), IPA(10 min), DI water(5 min)의 순서로 초음파 세척기를 사용하여 세정하였다. 세정한 실리콘 웨이퍼를 furnace 공정(dry oxidation)으로 100 nm의 SiO₂ 박막을 성장시킨 후, 표준 전자빔 resist인 PMMA resist를 SiO₂ 박막이 성장된 실리콘 웨이퍼 위에 coating하였다. PMMA resist 박막은 250 rpm의 저속으로 5초 동안 coating한 것과, 4000 rpm의 고속 스핀으로 40초 동안 coating한 것을 160 °C에서 4분 동안 soft bake 하였다. PMMA resist가 coating된 실리콘 웨이퍼를 초소형 전자빔 아래에 working distance가 대략 1 mm 되도록 장착하였으며 자체 제작한 pattern 생성기(generator)를 이용하여 pattern을 구현하였다.

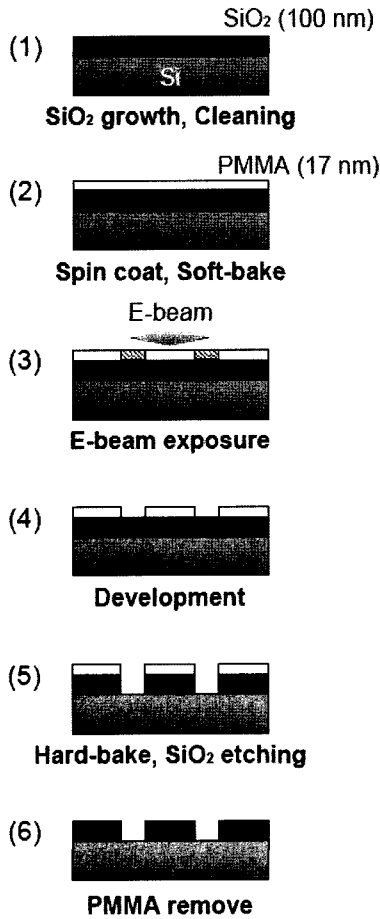


Fig. 3. Procedure of the electron beam patterning.

Fig. 4는 저 에너지 리소그래피를 위한 시스템 개요도를 나타내고 있다. 컴퓨터에서 디자인된 리소그래피 pattern을 pattern 생성기에 적절한 format으로 변환시키고, pattern 생성기는 scan 신호를 deflector controller에 피드백(feedback) 시킨다. Deflector controller는 전자칼럼의 deflector에 신호를 전달한다. 전자방출원으로부터 발생한 전자빔을 deflector에서 편향하여 scan하고, Einzel 렌즈에서 빔을 집속함으로써 PMMA resist를 노광(전자빔 에너지를 500 eV, 조사농도를 75 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 조사)시킨다. 전자빔으로 pattern이 노광된 sample은 MIBK : IPA = 1 : 3 solution으로 현상 한 후 IPA solution으로 린스를 하였다. 현상된 sample을 buffered oxide etching(BOE) solution에 담그기 전에 보호막 역할을 하는 PMMA가 BOE에 용해되지 않도록 160 °C에서 4분 동안 hard-bake 공정을 수행한다. BOE에서 60초 동안 etching을 한 후, 초음파 세척기를 이용하여 acetone으로 PMMA를 완전히 제거함으로써 원하는 SiO₂ 박막의 리소그래피 pattern을 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 저 에너지 초소형 전자칼럼 리소그래피 및 BOE에 의한 SiO₂ wet etching 공정을 통하여 형성된 line

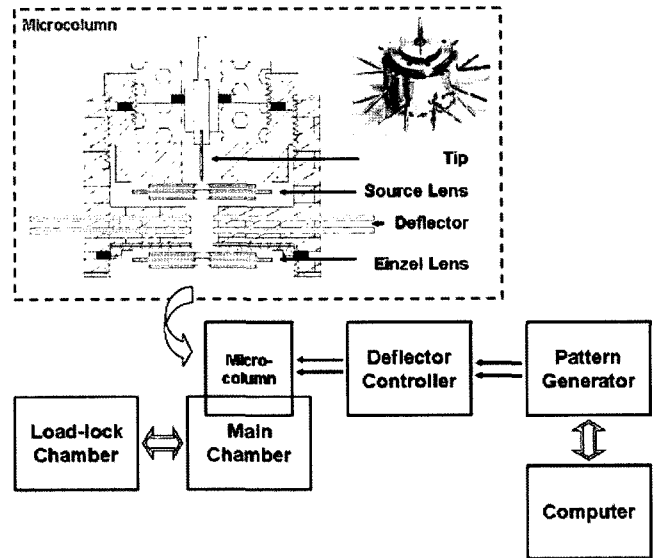


Fig. 4. Systematic diagram of the electron beam patterning.

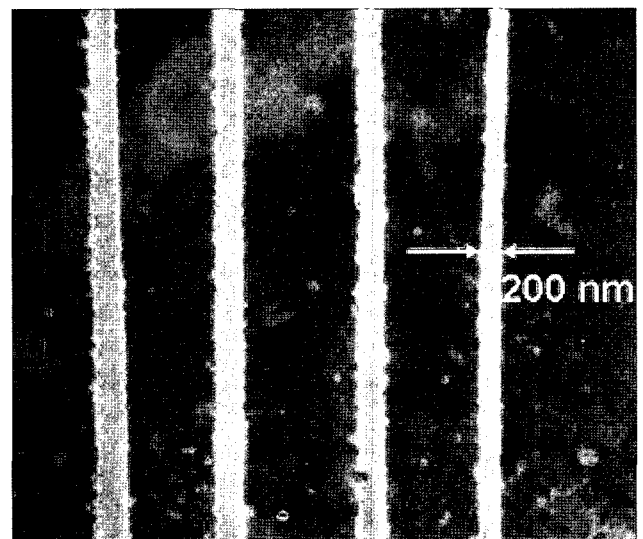


Fig. 5. SEM photograph of the line patterns formed through low energy microcolumn lithography and SiO₂ etching process.

pattern의 SEM 사진이다. Line 하나의 선폭은 ~200 nm 정도로 예리한 pattern은 아니지만 저 에너지 전자빔을 이용하여 두께가 100 nm인 SiO₂ 박막의 pattern을 형성함으로써 SiO₂ 박막에 대한 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정의 가능성을 입증하였다.

IV. 결 론

차세대 리소그래피 공정 기술로서 저 에너지의 초소형 전자칼럼을 이용한 리소그래피에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정을 위하여

SCM을 갖춘 저 에너지의 소형화된 리소그래피 시스템을 제작하여 전자빔 에너지와 조사농도에 따른 현상된 PMMA resist 두께를 측정하였으며, 실험에서 얻어진 적절한 PMMA resist 두께에 맞추어 PMMA resist coating을 한 다음 두께가 100 nm인 SiO₂ 박막의 리소그래피 pattern을 형성함으로써 고 분해능의 저 에너지 전자빔 리소그래피 공정의 가능성을 입증 하였다.

본 연구에서 형성한 line 하나의 선폭은 ~200 nm 정도로 예리한 pattern은 아니지만 저 에너지의 소형화된 리소그래피 시스템의 제작에 있어서 더 작고 적절한 aperture의 렌즈를 사용하고 source 렌즈, Einzel 렌즈, 그리고 전자방출원 등의 alignment를 개선할 경우 분해능이 수 nm인 저 에너지 미세 pattern 리소그래피를 이룰 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] K. E. Gonsalves, M. Thiyagarajan, J. H. Choi, P. Zimmerman, F. Cerrina, P. Nealey, V. Golovkina, J. Wallace, and N. Batina, *Microelectronic Eng.*, **77**, 27 (2005).
- [2] K. Vutova, G. Mladenov, I. Raptis, and A. Olziersky, *J. Materials Processing Technol.*, **184**, 305 (2007).
- [3] W. Zhang, A. Potts, D. M. Bagnall, and B. R. Davidson, *Thin Solid Films*, **515**, 3714 (2007).
- [4] H. S. Kim, M. L. Yu, M. G. R. Thomson, E. Kratschmer, and T. H. P. Chang, *J. Appl. Phys.*, **81**, 461 (1997).
- [5] E. Kratschmer, H. S. Kim, M. G. R. Thomson, K. Y. Lee, S. A. Rishton, M. L. Yu, S. Zolgharnain, B. W. Hussey, and T. H. P. Chang, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 3792 (1996).
- [6] H. Kim, C. Han, and K. J. Chun, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 4084 (2003).
- [7] J. W. Jeong, D. J. Kim, H. S. Kim, S. K. Choi, D. Y. Kim, and H. R. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 5565 (2005).
- [8] 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, and B. J. Kim, *Microelectronic Eng.*, **83**, 962 (2006).
- [9] S. J. Ahn, D. W. Kim, H. S. Kim, K. H. Cho, and S. S. Choi, *Appl. Phys. A*, **69**, s527 (1999).
- [10] J. Y. Park, J. D. Lera, M. A. Yakshin, S. S. Choi, Y. Lee, K. J. Chun, J. D. Lee, D. Jeo, and Y. Kuk, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **15**, 2749 (1997).

Study of SiO₂ Thin Film Patterning by Low Energy Electron Beam Lithography Using Microcolumns

T. Yoshimoto, H. S. Kim, D. W. Kim, and S. Ahn*

*Department of Physics and Advanced material Science/Center for Next-generation Semiconductor Technology,
Sun Moon University, Asan-si, Chungnam 336-840, Korea*

(Received 17 May 2007, in final form 10 August 2007)

Electron beam lithography has been studied as a next-generation lithography technology instead of photo lithography for ULSI semiconductor devices. In this work, we have made a low-energy electron beam lithography system based on the microcolumn and investigated the dependence of the pattern thickness on the energies and dose concentration of the electron beam. We have also demonstrated the potential of low-energy lithography by achieving 100 nm-SiO₂ thin film patterning.

Keywords : SiO₂ thin film patterning, low-energy lithography, microcolumn, PMMA resist