반도체및디스플레이장비학회지 제3권 제2호(2004년 6월)
Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology, Vol. 3, No. 2. June 2004.

Focused Ion Beam을 이용한 EUVL Mask Defect Isolation 및 Repair

김석구† · 백운규* · 박재근†
†한양대학교 나노 SOI 공정 연구실
*한양대학교 세라믹공학과

EUVL Mask Defect Isolation and Repair using Focused Ion Beam

SukGoo Kim†, Ungyu Paik*, and JeaGun Park†
†Nano-SOI Process Lab. Hanyang University,
*Department of Ceramic Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

Microcircuit fabrication requires precise control of impurities in tiny regions of the silicon. These regions must be interconnected to create components and VLSI circuits. The patterns to define such regions are created by lithographic processes. In order to image features smaller than 70 nm, it is necessary to employ non-optical technology (or next generation lithography: NGL). One such NGL is extreme ultra-violet lithography (EUVL). EUVL transmits the pattern on the wafer surface after reflecting ultra-violet through mask pattern. If particles exist on the blank mask, it can't transmit the accurate pattern on the wafer and decrease the reflectivity. It is important to care the blank mask. We removed the particles on the wafer using focused ion beam (FIB). During removal, FIB beam caused damage the multi layer mask and it decreased the reflectivity. The relationship between particle removal and reflectivity is examined: i) transmission electron microscope (TEM) observation after particle removal, ii) reflectivity simulation. It is found that the image mode of FIB is more effective for particle removal than spot and bar mode.

Key Words : EUVL, Blank Mask, FIB, TEM

1. 서 론

노광 공정은 반도체 wafer 표면을 덮고 있는 감광제(photo-resist)라 부르는 얇은 감광성 물질에 마스크 상의 기하학적인 패턴을 전사하는 공정이다. 이러한 패턴들은 집적회로(IC) 공정에서 이온 주입 영역과 접촉영역, 그리고 결합영역과 같은 다양한 지역을 정의한다. 집적회로를 제작하기 위한 노광 장비들 중에서 대다수는 자외선 광을 이용한다. 초미세의 집적회로 공정 요구에 광학 공정이 아직 해결하지 못한 몇 가지 한계점들이 있다. 비록 우리가 그것의 유용한 범위를 확대시키기 위해 상 변환 마스크 (Phase-Shifting Mask: PSM)나 광학 근접 보정 (Optical Proximity Correction: OPC)을 사용할 수 있지만, 마스크 생산과 정밀 검사가 복잡하기 때문에 쉽게 해결할 수 없다. 마스크의 가격 또한 매우 비싸고, 나노 크기의 집적회로 공정을 위해 광학 노광 공정의 새로운 노광 기술을 필요로 한다. 이런 점에서 극자외선(Extreme Ultra-Violet Lithography: EUVL) 노광은 최소 선폭을 30 nm까지 확장하기 위한 차세대 노광 기술이다[1]. EUVL 공정은 주사된 자외선 빔이 반사경과 마스크 패턴에 반사되어 wafer 표면에 전달된다. 이러한 반사경들은 분포된 1/4파 bragg 반사기를 만드는 다층 코팅으로 되어야만 한다. 게다가 공 마스크(blank mask)도 10~14 nm파장에서 반사도(Reflectivity)를 최대화하기 위해 다층 코팅 되어야만 한다. 공 마스크에 존재하는 결함은 표면에 있는particle로 인한Amplitude 결함과 다층 생성시 내부에 존재하는 Phase결함이 있으며, 이로 인해 마스크의 pattern 변화를 가져오며[2], buffer layer를 이용한 opaque

†E-mail : sukgoo@ihanyang.ac.kr
parkjgl@hanyang.ac.kr

defect과 clear defect에 대한 보상이 있었다[3]. 또한 ion beam을 이용한 공 마스크의 particle제거에 관한 연구도 보고되었다[4]. 공기중의 먼지 입자들은 wafer표면이나, 노광용 마스크에 증착되고, 소자에서 회로를 불량하게 만들 수 있는 결함을 발생시킨다. 반도체 표면의 먼지 입자는 에피택셜 막의 단결정 성장을 파괴할 수 있고, 전위 형성의 원인이 될 수 있다. 게이트 산화막 속에 포함된 먼지 입자들은 절연성을 떨어뜨려 낮은 항복(breakdown)전압으로 인한 소자의 불량을 초래한다. 그런 경우 노광 지역에서는 더욱 치명적이다. 우리는 본 연구에서 Focused Ion Beam(FIB)을 이용하여 이러한 공 마스크 위에 존재하는 particle로 인한 Amplitude 결함을 제거하는 방법에 대해 연구하였다. 또한 particle이 제거된 후 TEM 측정을 하였고, 모의실험을 통해 반사도를 측정하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 4인치 wafer를 사용하였으며 wafer를 세정 후 증착 장비에서 몰로브덴(Mo)을 50W, 0.5 mTorr. 46"동안 2.8 nm로 증착하고, 실리콘(Si)을 100 W, 0.5 mTorr, 145"동안 4 nm로 증착하였다.이러한 몰리브덴(Mo)과 실리콘(Si)을 1 pair로 하고 40 pair를 연속적으로 증착하였다. 다층으로 증착된 후 마스크 표면에는 공정 시 발생하는 particle이 존재하게 된다. 이러한 particle을 FIB장비를 이용하여 제거하였다. FIB는 Gallium ion source (Ga^+)를 이용하여 실리콘 표면을 선택적으로 Etching할 수 있고, 또한 텅스텐(W)을 증착 할 수 있다. 실험에 사용된 FIB 장비는 SMI-8300(SEIKO)이다. 가속전압이 30 kV에서 0.05 um의 해상도를 가지며 증착 비는 1 nm/sec가 된다. 이러한 FIB를 이용하여 공 마스크 표면에 있는 particle을 제거하였다. 대략적으로 particle의 size는 50 nm~1 um가 된다. Particle을 제거하기 위해 FIB의 image, spot, bar rotation mode로 실험을 하였다. 각 mode에 대해서 공 마스크 위에 존재하는 particle을 제거하였다. 모든 실험은 aperture 4에서 하였고, image mode에서는 배율이 ×50 k이고, 면적이 3.2× 2.8 um^2인 영역에서 실험을 하였다. Spot mode에서는 ×50 k, 100$^2\pi$ nm^2이고, bar mode에서는 ×30 k, 1.7×0.13 um^2인 영역에서 실험을 하였다. 각 mode에서 particle을 20회 이상 제거한 후 각각의 제거율을 비교하였다. Particle을 제거 후 TEM 시료를 만들어서 FIB ion beam에 의한 다층의 손상을 관찰하였다. 또한 일반적인 수식 계산에 의한 Multi-layer Reflectivity Simulation Program(MRSP) 모의 실험을 통해서 입사 되는 빛에 대해 특정 파장을 가지도록 하고, 반사도를 측정하였으며 particle이 존재하지 않을 때 공 마스크의 반사도와 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험에 의해 공 마스크 표면에 존재하는 particle을 제거하였다. Fig. 1은 particle 제거에 대한 FIB image 이다.

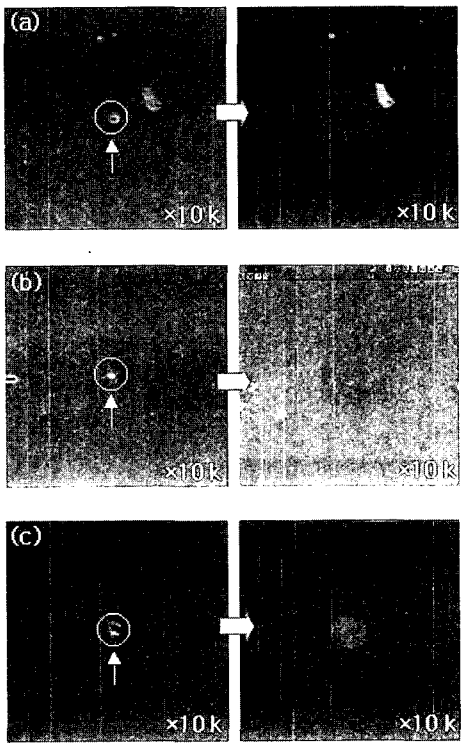

Fig. 1. FIB ion beam을 이용한 공 마스크 표면에서 particle 제거 전/후의 이미지.
(a) image mode, (b) spot mode, (c) bar mode

Fig. 1의 (a)는 image mode에 의한 particle제거로 particle size는 0.3 um이고, milling time은 60 s이다. Image mode에 의한 particle이 제거되었음을 오른쪽 그림을 통해서 알 수 있으며 FIB beam damage에 의해서 손상된 부분이 나타난다. 공 마스크 위에 많은 particle에 대해서 image mode로 제거를 해 본 결과 particle의 size는 1 um이하에서만 제거가 된다. 또한 particle의 높이에 대한 제거 시간의 차이가 보인다. Fig. 1의 (b)는 spot mode에 의해 particle을 제거한 것으로 particle size는 0.2 um이고, milling time은 0.1 s이다. 오른쪽 그림에서 보듯이 particle이 제거되었음을

알 수 있다. Particle의 size는 200 nm이하에서만 제거된다. 그 이유는 spot mode의 beam diameter가 0.2 um이기 때문이다. Fig. 1의 (c)는 bar mode에 의한 particle 제거 방법으로 particle size는 0.25 um이고, milling time은 30 s이다. Particle의 제거 크기는 <1 um이며, 높이에 따른 제거시간의 차이가 생긴다. 오른쪽 그림에서 보듯이 FIB ion beam에 의해서 손상된 부분이 나타난다. Particle 제거에 대해 3가지 mode로 실험을 해 본 결과 각 mode에 대한 제거율을 알 수 있었다. Fig. 2는 각 mode와 제거율과의 관계를 나타내고 있다.

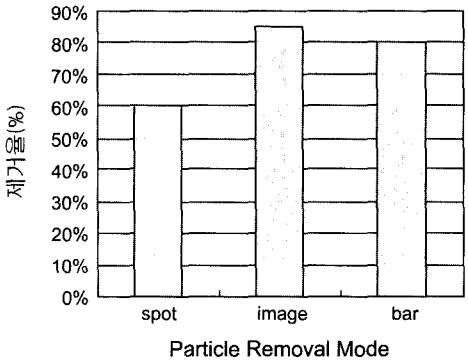

Fig. 2. Particle 제거 mode와 제거율과의 관계

각 mode에 대해서 일정한 면적을 가지고 실험을 하였다. Image mode에서 particle 제거율이 가장 높음을 알 수 있다. 그것은 가장 넓은 면적에서 particle을 제거하였기 때문이다. Image mode에서는 제거율이 85%, bar mode에서는 80%, spot mode에서는 60%가 된다. 또한 particle 제거에 따르는 FIB beam damage를 보기 위해 TEM 시료를 만들어서 관찰하였다. Particle 제거에 따른 FIB beam damage는 마스크의 다층을 손상시키며 이로 인해 마스크의 반사율 저하를 가져온다. Fig. 3은 FIB ion beam으로 각 mode에서 particle을 제거한 후 TEM image이다.

Fig. 3의 (a), (b)는 image mode로 손상 면적이 37 nm, 72 nm로 몰리브덴(Mo)과 실리콘(Si)이 6 pair, 12 pair에 해당한다. 그림 3(c)는 spot mode로 손상면적이 13.15 nm이고 6.2 pair에 해당한다. 그림 3(d)는 bar mode로 손상면적이 51 nm이며 8.5 pair에 해당한다. Image mode에서 etching damage 차이는 particle의 크기에 의한 milling time이 60s와 150s이기 때문이다. 각 mode에서 FIB ion beam에 의한 다층이 손상되었고 image mode에서 가장 크다. 시료 표면에 알루미늄(Al)과 텅스텐(W)을 증착하는 것은 시료 표면을 보호하기 위함과 TEM loading시 표면에 발생하는 charging 현상을 방지하기 위함이다. 이러한 FIB beam damage에 대한 시료를 모의 실험을 통해 반사도를 측정하였다. 표면에 FIB beam damage에 의한 상부 5층에 실리사이드 (silicide)층이 생성되었다고 가정하고[5], Particle을 제거한 후 모의실험을 통한 각 mode에서의 파장과 반사도와의 관계가 Fig. 4에 나타나 있다.

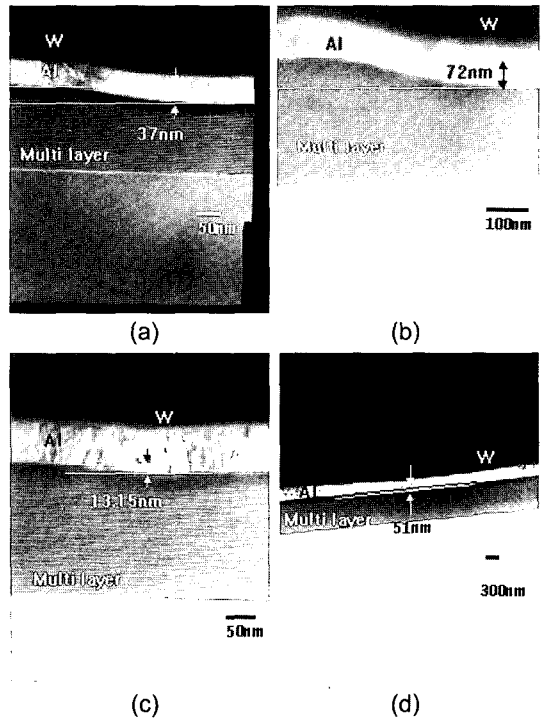

Fig. 3. FIB ion beam으로 각 mode에서 Particle을 제거 한 후 TEM image. (a) image mode 1 (b) image mode 2 (c) spot mode, and (d) bar mode.

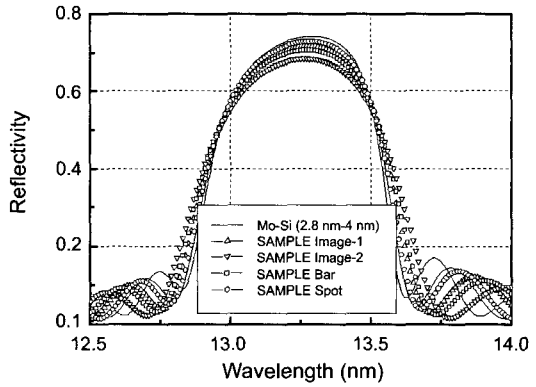

Fig. 4. Particle을 제거한 후 모의실험을 통한 각 mode에서의 파장과 반사도와의 관계.

Table 1. Particle 제거에 대한 결과

Milling방법	Image mode		Spot mode	Bar rotation mode
	1	2		
Particle size	0.3 um	0.4 um	0.2 um	0.25 um
Milling time	60 sec	150 sec	0.1 sec	30 sec
ML 손상면적	9.35 um^2	9.60 um^2	0.04 um^2	1.54 um^2
손상깊이(MAX)	37.00 nm	72.00 nm	13.15 nm	51.00 nm
제거율 (%)	85	90	60	80
Reflectivity (%)	71.688@13.28 nm	68.389@13.27 nm	72.828@13.28 nm	70.621@13.28 nm

Fig. 4의 image mode에서 파장은 13.28, 13.27 nm 이고 반사도는 71.688, 68.389%이다. Spot mode에서는 파장이13.28 nm이고, 반사도는 72.828%로 나타난다. Bar mode에서는 파장이 13.28 nm이고 반사도는 70.621%이다. 즉 각각의 반사도는 FIB beam damage와 관계가 있다. Damage가 클수록 반사도는 낮게 나타나고 damage가 작을수록 반사도는 높게 나타난다. 따라서 spot mode에서 반사도가 가장 높게 나타난다. 측정부분에서 반사도의 손실은 spot<image 1<bar <image 2순으로 크게 나타난다. 우리는 이러한 실험결과를 damage가 없는 다층에 대해서도 실험하였다. Fig. 5에 나타나 있다. 몰리브덴(Mo)-실리콘(Si) 구조에서 파장이 13.29 nm이고, 반사도는 74.227%이다.

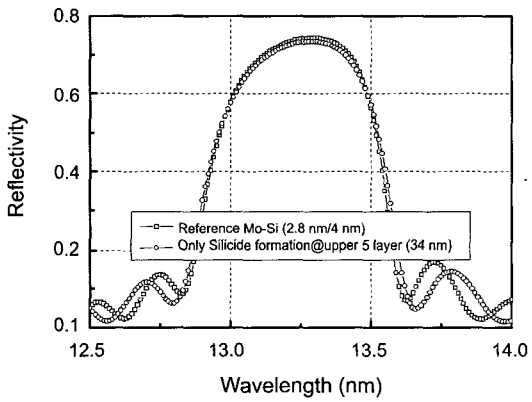

Fig. 5. 일반적인 공마스크의 파장과 반사도와의 관계

만약 주사된 빔이 반사에 의해 상부 5층에 실리사이드가 생성된 경우에는 파장이 13.29 nm이고, 반사도는 73.372% 이다. Particle을 제거한 경우에 FIB beam damage에 의한 다층손상으로 발생한 반사도의 감소는 6%이하로 나타나며 파장은 0.01 nm의 차이를 갖는다. 손상면적은 국부적인 영역에 대해서 작을수록 반사도가 좋아지며, 3차원적인 모의 실험이 필요하다. 반사도의 감소는 일반적으로 5%이하가 적당하다[3]. 실험에 대한 모든 결과를 Table 1에 나타내었다. 실험을 통해서 나타난 결과는 공 마스크 표면에 있는 particle을 제거하는 것이 무엇보다 중요하다. 각 image, spot, bar mode에 의해 나타난 결과는 image mode에서는 제거율이 좋지만 다층의 손상면적이 크게 나타난다. Image mode에서 손상면적은 9.35, 9.60 um^2 이다. Spot mode에서는 제거되는 시간이 짧고 손상면적이 작고 반사율이 좋지만 제거율이 낮은 단점이 있으며 손상면적은 0.04 um^2이다. 또한 bar mode는 손상면적이 1.54 um^2 이고, image mode와 spot mode 사이에 해당한다. 따라서 공 마스크 위에 particle을 제거하는 가장 효과적인 방법은 여러 가지를 비교해 볼 때 제거율 기준으로 image mode가 가장 적당하다.

4. 결 론

우리는 몰리브덴(Mo)과 실리콘(Si)으로 구성된 공 마스크 표면에 발생하는 particle을 FIB를 이용하여 제거하였다. FIB의 image, spot, bar mode는 공 마스크 표면에 있는 particle을 제거하는 효과적인 방법이다. Particle을 제거한 후 TEM 사진과 반사도 모의 실험을 통하여 각 mode에 대한 결과를 비교하였다. Particle의 size는 대부분이 1 um 이하이며, image mode에서는 milling time이 길고, 손상 면적과 깊이도 크게 나타나는 반면 제거율은 가장 좋다. Spot mode에서는 milling time과 손상 면적과 깊이가 가장 작게 나타난다. 반면 제거율은 낮게 나타난다. Bar rotation mode에서는 image mode와 spot mode의 중간에 해당한다. 공 마스크에 있는 particle을 제거하는 가장 효과적인 mode는 여러 면을 고려해 볼 때 image mode이다. 그러나 현재의 FIB 방법은 다층을 파괴하는 방법이므로 비파괴 분석기술이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 "나노급 반도체용 EUV Lithography 핵심기술 사업"의 지원아래 이루어 졌으며, 안정훈 과장님, 한병희 연구원에게 고마움을 전합니다.

참고문헌

1. Gwyn, C. *et al.*, "Extreme Ultraviolet Lithography", White Paper, Sematech, Next Generation Lithography Workshop, Colorado Springs, Dec. 7-10 (1998).
2. Gullikson, E.M., Cerjan, C., Stearns, D.G., Mirkarimi, P.B., and Sweeney, D.W.: *J. Vac. Sci. Technol.* B **20**, 81 (2002).
3. Liang, T., Stivers, A., Livengood, R., Pei-Yang, G. Zhang, and Lo, F.C.: *J. Vac. Sci. Technol.* B **18**, 3216 (2000).
4. Barty, A., Mirkarimi, P.B., Stearns, D.G., Sweeney, D., Chapman, H.N., Clift, M., Hector, S., and Yi, M., *Emerging Lithographic Technologies VI, Proceedings of SPIE.* **4688**, 385 (2002).
5. Mirkarimi, P., Stearns, D., Baker, S., Elmer, J., Sweeney, D., and Gullikson, E.: *J. Appl. Phys.* **91**, 81 (2002).