

논문 2006-43SD-8-1

극자외선 리소그래피용 마스크의 결함 검출

(Defect Inspection of Extreme Ultra-Violet Lithography Mask)

이 문 석*

(Moonsuk Yi)

요 약

본 논문은 극자외선 리소그래피용 마스크의 결함을 극자외선을 이용하여 검출하는 방법과 기존의 가시광선을 이용하여 결함을 검출해 내는 시스템과 비교하고, 인위적으로 만들어진 결함을 이용하여 극자외선이 결함에 조사되었을 때의 반사되는 패턴을 분석하였다. 포커스된 극자외선을 래스터 스캔 방식으로 조사하면서 반사되는 극자외선의 세기를 비교함으로써 결함을 발견해 내는 시스템을 구축하였고, 이를 이용하여 기존의 가시광선을 이용하는 결함 검출 장비와 상관 실험을 진행하여 반사된 빛의 세기로 예측한 결함의 크기가 두 검출 방법 사이에 강한 상관관계를 가짐을 확인하였다. 또한, 인광판을 이용하여 극자외선이 결함에 조사되어 반사되는 패턴을 영상화하여 크기별, 결함의 종류별로 다른 프린지 패턴을 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

At-wavelength inspection system of extreme Ultra-violet lithography was developed and the inspection results were compared with the optical mask inspection system by cross correlation experiments. In at-wavelength EUV mask inspection system, a raster scan of focused euv light is used to illuminate euv light to mask blank and specularly and non-specularly reflected euv light are detected by photo diode and microchannel plate. The cross correlation results between at-wavelength inspection tool and optical inspection tool shows strong correlation. Far-field scattering fringe pattern from programmed phase and opaque defect, which were detected by phosphor plate and CCD camera shows that distinct diffraction fringes were observed with fringe spacing dependent on the defect size.

Keywords : 극자외선, EUV, 마스크, defect, inspection

I. 서 론

반도체 제조 공정 기술 중 가장 비용이나 기술적인 면에서 큰 비중을 차지하는 기술이 바로 리소그래피 기술이다. 현재 193nm ArF 엑시머 레이저에서 나오는 DUV(deep ultra violet) 광선을 이용하지만, 이 파장으로는 RET(resolution enhancement technique)을 동원하더라도 70nm 이하의 패턴을 만들어 내기가 쉽지 않다. 따라서 70nm 급 혹은 50nm급 반도체 제조를 위하여 157nm 파장을 이용하거나, immersion 기술을 새로

이 도입하려는 노력들이 진행되고 있다.^[1,2] 하지만, 회절이라는 물리적 현상을 극복하여 파장의 3분의 1 수준의 선폭을 얻기 위해 추가되는 여러 가지 기술들은 전체 리소그래피 공정 비용을 증대시키고 리소그래피 시스템을 더욱 복잡하게 만드는 양상을 낳고 있다.

50nm급 이하의 반도체 제조용 리소그래피 기술로서 여러 가지 가능성에 대해 연구가 진행되고 있는데, 그 중에 극자외선 리소그래피 기술은 최소 선폭 30nm 수준까지 적용 가능한 반도체 제조용 리소그래피 기술 중 에서 가장 가능성 있는 후보 기술로 평가 받고 있다.^[3] 이 기술은 13nm 근처의 극자외선(extreme ultra violet) 광선을 이용하는데, 기존의 투사형(projective) 광학계가 아니라 Mo/Si 다층 박막을 기반으로 하는 반사형 광학계를 사용한다. 광학계뿐만 아니라 마스크도 반사형 마스크를 사용하여야 하는데 낮은 열팽창 계수를 가진

* 정회원, 부산대학교 전자전기공학부
(School of Electrical Engineering, Pusan National University)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2006년1월20일, 수정완료일: 2006년7월26일

물질을 기판으로 하여 Mo/Si 다층 박막을 도포한 마스크 기판(blank) 위에 흡수체로 회로 패턴을 만들어 사용한다.

다른 모든 차세대 리소그래피 기술에서와 마찬가지로, 마스크의 결함(defect) 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히 EUVL 마스크에서는 흡수체 패턴의 defect 뿐만 아니라, 마스크 blank와 Mo/Si 다층 박막에서도 defect가 발생할 수 있다. 흡수체 패턴의 결함은 이미 잘 알려진 선택적 증착 혹은 에칭 방법으로 쉽게 해결할 수 있지만,^[4] 다층 박막 증착 전에 기판위에 생긴 defect로 인해 생긴 다층 박막의 defect 문제는 아직까지도 명확한 해결 방법이 부족한 실정이다.^[5] 마스크 blank에서의 defect는 마스크에서 반사되어 웨이퍼와 조사될 빛의 intensity와 phase를 변화시켜 process window를 감소시키는 결과를 낳게 된다. 예를 들어, 어떤 한 defect가 다층 박막의 성장을 방해하게 되면 이 defect로 인해 다층박막에서 반사되는 빛의 intensity를 저하시키는 결과를 초래하게 된다(opaque defect). 반면에 마스크 blank 위에 defect가 있고, 그 위에 다층 박막이 conformal하게 증착되었을 때는 반사된 빛의 phase만 변화시키고, intensity는 거의 변화시키지 않는다(phase defect). 이러한 프린트가 될 수 있는 defect들의 수는 단위 제곱 센티미터당 최대 0.005 개를 넘어서는 안 되는 것으로 알려져 있다.^[6] 따라서 defect 수를 줄이고, defect 검출 기법에 대한 연구가 필수적이라 할 수 있을 것이다.

마스크의 결함을 검사하는 방법에는 기존의 가시광선을 이용하여 scattering된 빛을 여러 각도에서 검출하여 결함을 찾아내는 방법이 EUV 마스크에도 쓰여 왔다. 이 방법은 속도와 sensitivity 측면에서 우수한 특성을 보이지만, 근본적으로 EUV 파장이 아니라 가시광선 영역의 파장을 사용하기 때문에 마스크의 다층박막의 EUV 광선과의 상호 작용을 대변하지 못하는 결점을 가지고 있다. 따라서 실제로 리소그래피에서 사용할 같은 파장(at-wavelength)의 빛을 이용한 defect 검출 기법이 필요한 것이다. At-wavelength 검출 기법은 EUV 빛과 마스크의 다층박막과의 직접적인 상호작용을 대변하여 defect의 printability test에도 사용되어 질 수 있다. 또한 다른 양산용 검출 기법들과의 상호 상관실험(cross correlation experiment)을 통하여 기술 개발의 초기 단계에서 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다.

광학 파장을 이용하는 검출 장비와 EUV 파장을 이용하는 검출 장비 사이의 상호 상관 실험(cross

correlation experiment)을 진행하기 위하여 우선 다층 박막이 입혀진 마스크 blank의 native defect를 광학 검출 장비로 검사하고 다시 EUV 검출 장비를 이용하여 검출하여 상관관계를 조사한다. 상호간의 defect map을 비교하는 과정을 통하여 광학 검출 장치로는 발견되지 못하는 defect를 발견할 수도 있을 것이다. 또한 인광판과 CCD 카메라를 이용하여 scattered EUV 빛의 far-field diffraction 패턴을 조사함으로써 defect의 모양, 크기 등의 추가 정보를 획득하는 데에도 많은 도움이 될 것이다.

II. 본 론

1. EUV 스캐너(Scanner)

EUV 파장을 이용한 마스크 defect 검출 장비는 방사광 가속기의 EUV 빔라인에서 나온 EUV 빛을 focusing optics를 이용하여 마스크 표면에서 $2\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 크기의 spot으로 만들어 주고, 마스크 스테이지를 raster scan 방식으로 움직이면서 이때 반사되는 EUV 빛(specularly reflected light: bright field)과 scattering되는 빛(non-specularly reflected light: dark field)을 photo diode와 micro channel plate를 이용하여 감지함으로써 defect를 검출해 내는 장치이다. 포커싱된 EUV spot이 defect를 지날 때는 bright field의 크기는 defect에 의해 저하된 반사율에 의해 작아질 것이고, dark field의 크기는 defect에 의해 scattering된 intensity의 증가로 인해 커질 것이다. 그림 1은 EUV scanner의 개념도를 그린 것인데, bright/dark field를 동시에 검출하기 위하여 입사하는 빛은 마스크의 표면의 수직 방향과 9° 정도 기울어져 있다.

2. Far-field scattering 검출 시스템

UV 파장을 이용한 마스크 defect 검출 장비는 방사광 가속기의 EUV 빔라인에서 나온 EUV 빛을 focusing optics를 이용하여 마스크 표면에서 $2\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ 크기의 spot으로 만들어 래스터 스캔 방식으로 조사하면서 이때 반사되는 bright field 반사광과 scattered된 dark field 반사광을 각각 photo diode와 micro channel plate를 이용하여 angular integration된 값을 비교하여 defect를 검출하게 된다. 하지만 integration된 값은 defect를 검출하는 면에서는 좋은 정보를 제공하지만, defect의 특성, 예를 들면 크기, 형태, 재질 등에 대한 정보는 전형 제공하지 못하는 단점이 있다.

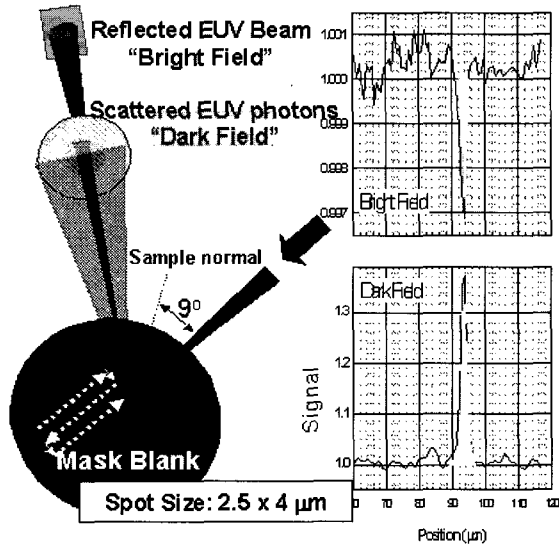


그림 1. EUV scanner의 개념도
Fig. 1. Conceptual configuration of EUV scanner.

이런 단점을 개선하여 각 defect의 크기와 재질, 혹은 모양에 따라 어떻게 다른 scattering 패턴을 보여 주는가를 알아보는 것도 defect의 특성을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이다. 그림 2와 같이 형광판으로 phosphor plate를 이용하고 CCD 카메라를 설치하면 focused EUV light이 defect를 조사되었을 때 scattering 되는 패턴, 즉 dark field image를 CCD 카메라를 통하여 볼 수 있다. 또한 phosphor 형광판과 CCD assembly를 이동하면 bright field image도 CCD를 통하여 보는 것이 가능하다. 이러한 장치를 통하여 EUV 빛이 defect에 조사되었을 때의 far-field scattering 패턴을 분석 함으로서 defect의 여러 가지 특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

3. 가시광선을 이용하는 검출 시스템과의 상관관계
기존의 가시광선을 이용하는 검출시스템과 EUV 파장을 이용하는 검출 시스템과의 상관관계를 알아보는 것은 양산용 검출 장비를 개발하는 문제와 맞물려서 가시광선을 이용하는 기존의 검출 방법으로 모든 EUV printable defect를 검출해 낼 수 있는냐하는 문제와 직결되어 있다.

우선 상관관계 실험을 위해서는 다층박막이 코팅된 EUV 마스크 기판을 가시광선 검출 시스템으로 검사한 후 그 좌표를 EUV 검출시스템에서의 좌표로 환산한 후 각각의 defect의 위치로 이동하여 EUV 검출을 시도

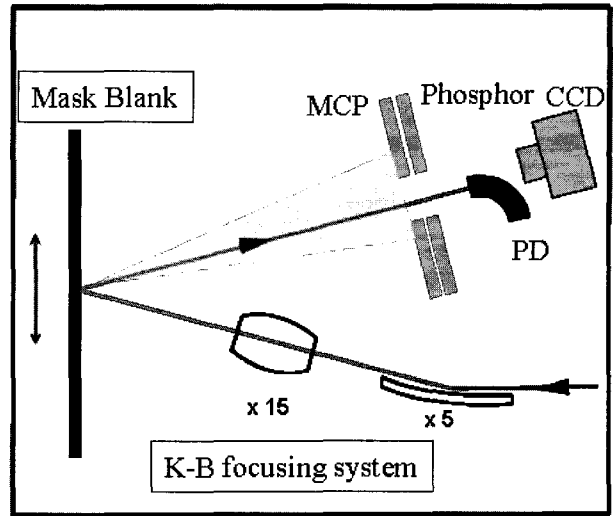


그림 2. Far-field scattering 검출 시스템 개략도
Fig. 2. Schematic layout of far-field scattering detection system.

해서 bright/dark field의 크기를 얻어 낸다. 가시광선을 이용하는 검출 시스템도 표면의 morphology의 차이를 이용해서 검출함으로써 scattered light의 세기를 이용하여 그 크기를 예측할 수 있다. 그림 3은 두 실험을 통하여 관찰된 두 가지 검출방식의 상관관계를 나타내고 있다. 역삼각형으로 표시된 몇 개의 defect를 제외하곤 두 가지 검출 방식 사이에 강한 상관관계가 있음을 잘 보여준다. 이러한 상관관계 실험은 향후 가시광선을 이용하는 양산용 검출 시스템이 필요할 때, 기술개발 측면이나 가시광선 검출 시스템의 유용성을 검증할 때 중요한 자료를 제공하게 될 것이다.

II. 실험 결과

1. Programmed defect의 far-field scattering 패턴 분석

그림 2의 장치를 이용하여 focused EUV 빛이 defect에 조사되었을 때의 dark field fringe pattern을 분석함으로써 defect의 크기별 종류별 특성 분석을 시도하였다. 먼저 0.8μm에서 1.5μm 크기의 defect를 phase defect의 형태와 opaque defect의 형태로 제작하였다. phase defect의 경우 Mo/Si 다층 박막을 입히기 전에 기판에 0.25μm depth로 식각한 후 다층박막을 도포하여 제작하였고, opaque defect의 경우는 다층박막을 도포한 후 0.15μm 두께의 Al을 도포하여 여러 가지 크기의 programmed defect array를 제작하였다.

길이 8μm의 바모양의 defect를 focused beam spot이

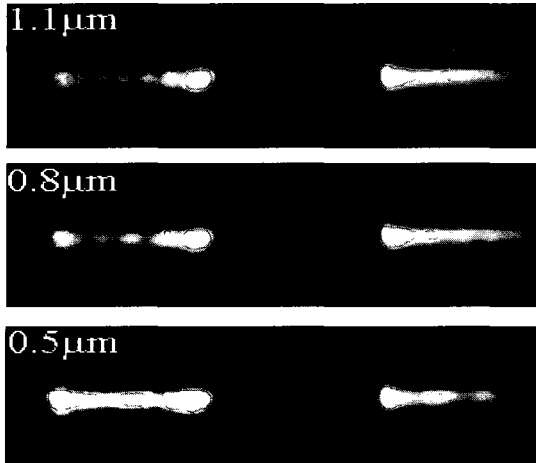


그림 3. 세 가지 다른 크기의 opaque defect의 dark field scattering fringe 패턴

Fig. 3. Dark field fringe patterns of three different size of opaque defects.

지난 갈 때의 bright field pattern을 보면 beam spot이 defect의 한가운데를 지나갈 때 가장 반사되는 빛의 세기는 저하되었는데, 그 정도는 opaque defect의 경우가 phase defect의 경우보다 2배 이상 크게 나타났다. Opaque defect에 의해서는 반사되는 beam spot의 크기가 spot이 defect를 맞는 위치에 따라 크게 변하지 않았지만, phase defect의 경우는 beam spot이 defect의 한가운데를 지나갈 때 35% 정도 beam spot이 퍼지는 현상이 일어났다. 이는 phase defect의 경우 defect의 edge가 다층박막의 도포에 의해 평탄화된 것에 기인한 것으로 보인다.

Bright field pattern 뿐만 아니라 dark field pattern의 경우 phase 혹은 opaque defect의 형태와 상관없이 defect의 수평 방향의 크기에 따라 반사된 dark field pattern의 회절 패턴의 fringe spacing이 결정되었다. 그림 3는 opaque defect의 경우 세 가지 크기의 defect에 대해 dark field fringe pattern를 보여 주고 있다. Defect의 폭이 넓을수록 적은 fringe spacing을 보여주어 기본적인 회절 이론을 만족시키고 있었다.

2. 가시광선을 이용한 검출 장비와의 검출력 비교 실험 결과 분석

기존의 가시광선을 이용하여 dark field scattering을 검출하여 defect를 검출해 내는 두 회사의 장비들과 EUV 광선을 이용하는 at-wavelength 검사 장비의 결함 검출 능력을 비교하였다. 6인치 웨이퍼 위에 60nm 크기의 Au sphere를 랜덤하게 뿌리고, 그 위에 80층의

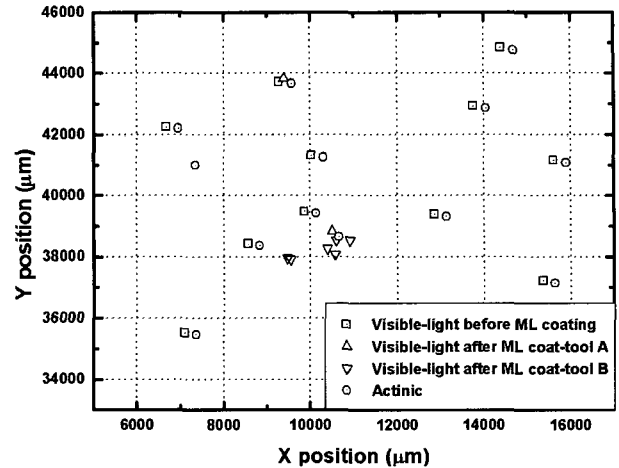


그림 4. Mo/Si 다층박막에 의해 mitigated phase defect의 가시광선 검출 시스템과의 비교 실험 결과

Fig. 4. Resolution comparison results between the visible light inspection tools and the actinic inspection tool by comparison of detecting capability of mitigated phase defects.

Mo/Si 겹층으로 도포된 마스크 기판을 실험에 이용하였다. 먼저 Mo/Si 다층박막을 도포하기 전에 가시광선을 이용하는 장비를 이용하여 Si 웨이퍼 위에 뿌려진 60nm 크기의 Au sphere를 검출한 후 Mo/Si 다층박막을 도포한 후 at-wavelength(actinic) 검출 장비를 이용하여 검사를 진행한 후, 다시 두 회사의 가시광선을 이용하는 장비를 이용하여 검출 실험을 진행하였다.

그림 4는 가로 세로 1cmX1cm 크기의 면적에서 진행된 검출 결과를 보여 주고 있다. 11개의 Au sphere가 다층박막 도포 전에 가시광선을 이용하는 장비를 통하여 검출되었고, 11개 모두가 다층박막 도포 후 actinic 검출 장치를 통하여 검출되었다. 하지만, 가시광선을 이용하는 장비를 이용한 경우엔, 한 개의 Au sphere만이 검출되었다. AFM(atomic force microscope)를 이용한 검사 결과, 60nm 크기의 Au sphere는 80 겹층의 Mo/Si 도포 후 11nm 높이에 70nm(Full width half maximum) 넓이의 결함으로 확인되었다.

IV. 결 론

EUV 파장의 빛을 이용하여 EUV 리소그래피용 마스크 기판의 결함을 검출해 내는 시스템을 만들어 실제로 결함을 검출해 내는 실험을 진행하였다. 포커스된 EUV 빛을 래스터 스캔 방식으로 조사하여 반사되는 빛과 스캐터링되는 빛의 세기를 측정함으로써 결함을 검출해 내는 시스템으로 결함 검출 능력은 결함의 높이 기준으

로 2nm 수준까지 검출이 가능하였다.

결함의 분석을 위하여 스캐터링되는 빛의 회절 패턴을 인광판과 CCD 카메라를 이용하여 영상화함으로써 결함의 크기에 따라 회절 패턴의 크기가 달라지는 것을 확인하였으며, 결함이 phase 혹은 opaque 형태에 따라서는 반사되는 빛의 모양이 변하는 것을 확인하였다.

기존의 가시광선을 이용하는 마스크 검사 장비와의 상관 실험을 진행하여, 두 검출 장비가 예측하는 결함의 크기 사이에 강한 양의 상관관계가 있음을 확인하였다. 또한, Mo/Si 다층 박막에 의해 결함의 크기가 축소된 Au sphere 결함에 대해서 가시광선을 이용한 장비와의 검출력 비교 실험을 진행하여 우수한 검출 능력을 가지는 것을 확인하였다. 이 실험을 통하여 현재 2nm 높이의 phase 결함도 검출이 가능한 시스템임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Pease, "Lithographic technologies that haven't made it: lessons learned," Proceedings of SPIE Vol. 5751, pp. 15-25, May 2005.
- [2] J. Chen, L. Chen, T. Fang, T. Fu, L. Shiu, et al., "Characterization of ArF immersion process for production," Proceedings of SPIE Vol. 5754, pp. 13-22, May 2005.
- [3] C. W. Gwyn, R. Stulen, D. Sweeney, and D. Attwood, "Extreme ultraviolet lithography," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 16, no. 6, pp. 3142-3149, Nov/Dec 1998.
- [4] P. Yan, S. Yan, G. Zhang, J. Richards, P. Kofron, and J. Chow, "EUV mask absorber defect repair with focused ion beam," Proc. SPIE Vol. 3546, pp. 206-213, Dec 1998.
- [5] E. M. Gullikson, C. Cerjan, D. G. Stearns, P. B. Mirkarimi, and D. W. Sweeney, "Practical approach for modeling extreme ultraviolet lithography mask defects," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 20, no. 1, pp. 81-86, Jan/Feb 2002.
- [6] S. Hector and P. Mangat, "Review of progress in extreme ultraviolet lithography masks," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 19, no. 6, pp. 2612-2616, Nov/Dec 2001.

저 자 소 개



이 문 석(정회원)

1991년 포항공과대학교 전자전기 공학과 학사 졸업.

1995년 포항공과대학교 전자전기 공학과 석사 졸업.

1999년 포항공과대학교 전자전기 공학과 박사졸업.

1996년 2월~1997년1월 미국 UW-Madison CXrL 방문연구원

1999년 7월~2002년10월 미국 LBNL. Post Doc./Staff Scientist

2002년12월~2004년 8월 삼성전자 반도체총괄 책임연구원

2004년 9월~현재 부산대학교 전자전기공학부 조교수.

<주관심분야 : 반도체 소자, 공정, OTFT>