

투과율 조절 포토마스크 기술의 ArF 리소그래피 적용

이동근

삼성전자주식회사 반도체연구소

④ 449-711 경기도 용인시 기흥읍 농서리 산 24번지

박종락[†]

조선대학교 광기술공학과

④ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

(2007년 1월 9일 받음, 2007년 2월 21일 수정본 받음)

본 논문에서는 포토마스크 후면에 위상 패턴을 형성하여 웨이퍼 상 CD(critical dimension) 균일도를 개선할 수 있는 투과율 조절 포토마스크 기술을 ArF 리소그래피에 적용한 결과에 대하여 보고한다. 위상 패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 변화 계산에 포토마스크 후면으로부터 포토마스크 전면까지의 광의 전파를 고려하여 ArF 파장에서의 위상 패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 저하에 관한 실험 결과를 이론적으로 재현할 수 있었다. 본 기술을 ArF 리소그래피에 적용하여 DRAM(Dynamic Random Access Memory)의 한 주요 레이어에 대해 필드 내 CD 균일도를 3σ 값으로 13.8 nm에서 9.7 nm로 개선하였다.

주제어 : ArF lithography, Photomask, Transmittance controlled mask, Critical dimension uniformity

I. 서 론

리소그래피 등을 포함한 반도체 집적소자의 제작분야에 있어서 기술적 측면에서는 해상도(resolution)의 향상이, 공정적인 측면에서는 결점(defect) 최소화가 가장 큰 관심사이다. 해상도의 향상은 집적도의 향상을 통해, 결점(defect) 최소화는 제품의 수율(yield) 향상을 통해 제품 생산성 증대에 직접적으로 기여하고 있다. 해상도의 향상과 더불어 CD(critical dimension) 균일도(uniformity)에 대해서도 점점 더 엄격한 관리가 요구되고 있으며,^[1] CD(critical dimension) 균일도(uniformity) 향상은 결점 최소화와 함께 수율 향상을 위한 매우 중요한 기술적 요건으로 인식되고 있다.

MPU(Micro-Processor Unit)나 ASIC(Application Specific Integrated Circuits)의 경우 DRAM(Dynamic Random Access Memory)에 비해 CD 균일도 자체가 최종제품의 성능에 더욱 더 직접적인 영향을 미치기 때문에 훨씬 더 엄격한 관리가 요구된다. 그러나 일반적으로 DRAM 생산에는 MPU보다 긴 노광파장이 사용되고 있으며, DRAM의 경우 MPU, ASIC에 비해 더 작은 최소 피치를 구현해야 하기 때문에, DRAM, MPU, ASIC 양산을 위한 CD 균일도 관리에 대한 요구는 거의 대등하거나 오히려 DRAM의 경우가 더 어려운 것으로 파악되고 있다.^[2]

CD 균일도 요구를 만족시키기 위한 기본적인 방법은 웨이퍼 제작 각 공정에서의 CD 균일도를 최대한 확보하는 것이다, 가속되고 있는 선풍 축소와 이에 따른 공정 구현의 어려

움 때문에 CD 균일도 보정기술 개발에 대한 요구가 차세대 반도체소자 공정기술 개발현장을 중심으로 자연스럽게 발생하고 있다.^[2-4] 현재까지 제안된 가능성 있는 웨이퍼 상 CD 균일도 보정기술은 스캐너를 능동적으로 사용하는 방법,^[2] 투과율 조절 포토마스크를 사용하는 방법^[3,4] 두 가지를 들 수 있다. 스캐너를 능동적으로 사용하는 방법은 CD 균일도 보정에 대한 매우 훌륭한 시나리오를 제공하고 있으나,^[2] 슬릿(slit) 방향에 대한 균일도 보정에 한계가 있으며, 노광 레이저 펄스의 능동적 에너지 제어가 가능한 고가의 장비를 필요로 한다는 단점을 지니고 있다.^[3,4] 포토마스크 후면에 위상 패턴을 형성하고 포토마스크의 위치별 투과율을 조절하여 웨이퍼 상 CD 균일도를 개선하는 방법이 보고되었다.^[3,4] 이 방법에서 투과율 변화는 180도 상대 위상을 갖도록 포토마스크 후면의 석영면을 쇠각한 콘택홀(contact-hole) 형태의 위상 패턴을 사용하여 유도하고 있으며, 투과율의 위치별 조절은 위상 패턴의 패턴 조밀도를 국소적으로 변화시켜 구현하고 있다. 이 기술은 포토마스크 자체의 CD 불균일에 기인한 웨이퍼 상 CD 불균일 뿐만 아니라 광 노광 장치의 플레어(flare)에 기인한 웨이퍼 상 CD 불균일 보정에도 효과적이 이 보고 되었다.^[4]

본 논문에서는 투과율 조절 포토마스크 기술을 ArF 리소그래피에 적용한 결과에 대하여 기술한다. 2장에서는 패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 저하 계산에 대한 이론적 고찰을 다루고 있으며, ArF 파장에서의 실험결과 재현을 위해 포토마스크 후면으로부터 포토마스크 전면까지의 광의 전파를 계산과정에 고려한 내용에 대하여 기술하도록 하겠다. 3장에서는 2장에서 소개한 이론의 패턴 조밀도에 따른 노광 광세

[†]E-mail: ejrpark@chosun.ac.kr

기 저하에 대한 계산 결과와 실험 결과의 비교 그리고 투과율 조절 포토마스크 기술을 ArF 리소그래피에 적용한 실험 결과에 대해 소개하며, 마지막으로 4장에서 결론을 맺도록 하겠다.

II. 이론적 고찰

포토마스크 후면의 위상패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 저하를 계산하기 위해 푸리에(Fourier) 변환에 기초한 준해석적(semi-analytical) 이론이 도입되어 사용되었었다.^[3,4] Köhler 조명 조건에서 조명 동공면(illumination pupil)에서의 전기장과 마스크면(mask plane)에서의 전기장은 서로 푸리에 변환 관계에 있으며, 마스크면에서의 전기장과 투영광학계의 동공면(pupil plane)에서의 전기장 또한 푸리에 변환 관계에 있다. 따라서 후면의 위상 패턴에 의해 변화된 조명 조건은 본래 조명 조건의 광세기 분포와 후면 위상 패턴의 푸리에 파워 스펙트럼과의 convolution으로 계산될 수 있음을 알 수 있다. 푸리에 변환에 기초한 준해석적 이론 결과와 KrF 노광파장(248 nm)에서 측정한 후면 위상패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 저하 결과 비교에 대한 보고가 있었다.^[4] 실험 결과와 비교하였을 때 패턴조밀도에 따른 노광 광세기의 저하 기울기 절대값이 조금 작게 계산되었으나 측정 오차 안에서 두 결과가 일치하고 있음이 보고되었다.^[4] 3장에서 살펴보겠지만, ArF 노광파장(193 nm)에 대해서는 푸리에 변환에 기초한 준해석적 이론을 이용하여 계산한 결과와 실험 결과 사이에 KrF 경우에 비해 현저히 큰 정량적 차이가 있음이 본 연구 진행 중에 발견되었다. 푸리에 변환에 기초한 준해석적 이론은 포토마스크 후면으로부터 주 패턴이 존재하는 포토마스크 전면까지의 광의 전파에 대한 고려가 포함되어 있지 않은 이론적 접근법이며, 이 때문에 ArF 노광 파장에서 이론적 결과와 실험적 결과 사이에 정량적 차이가 발생하고 있는 것으로 사료된다. 2장에서는 위상 패턴이 존재하는 포토마스크 후면으로부터 주 패턴이 존재하는 포토마스크 전면까지의 광의 전파를 고려하여 시뮬레이션을 수행한 내용에 대해 기술하도록 한다.

물리광학(physical optics) 이론에 근거하여 모델링을 수행하였는데, 회절 계산법 중 가장 효과적이고도 정확한 해를 주는 것으로 알려진 각도 스펙트럼 접근법(angular spectrum approach)에 기반을 둔 스칼라 회절 이론을 적용하였으며, 이 방법은 Rayleigh-Sommerfeld 회절 이론과 동일한 결과를 주는 것으로 알려져 있다.^[5]

각도 스펙트럼 접근법을 이용한 회절이론에 대해 간략히 소개하기로 한다.^[5] $z=0$ 인 지점에서의 전기장 분포가 $U(x,y,0)$ 이라면, 이를 다음 수식(2차원 푸리에 변환)을 이용하여 각도 스펙트럼 $A(f_x, f_y; 0)$ 으로 분해한다.

$$A(f_x, f_y; 0) = \iint U(x, y, 0) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (1)$$

위 식에서 $A(f_x, f_y; 0)$ 는 방향 코사인인 ($\alpha = f_x \lambda, \beta = f_y \lambda, \gamma = \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}$)인 평면파를 의미한다. 등방균질 매질을 통해 전자기파가 진행한다고 가정하면, 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식을 이용하여 z 축 상 임의의 지점에서의 각도 스펙트럼 $A(f_x, f_y; z)$ 는 다음과 같이 주어짐을 증명할 수 있다.

$$A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; z\right) = A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z\right) \quad (2)$$

z 축 임의의 지점에서의 전기장 분포 $U(x, y, z)$ 는 $A(f_x, f_y; z)$ 를 역 푸리에 변환하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$U(x, y, z) = \iint A\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} z\right) \times \exp\left[i 2\pi \left(\frac{\alpha}{\lambda} x + \frac{\beta}{\lambda} y\right)\right] d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (3)$$

계산과정을 그림 1에 도식적으로 나타내었다. 조명 동공면의 원점에 해당하는 점광원은 마스크에 평행 입사하는 평면파를 만들게 된다. 이 평면파에 대해 후면 위상 패턴을 통과하고 마스크 전면까지 진행하는 과정을 앞서 설명한 회절이론을 바탕으로 계산한다. 이어서 투영광학계를 통과하여 투영광학계의 동공면에 형성되는 조명 동공면의 점 광원에 대한상을 계산한다. 이 결과는 일종의 마스크 후면 위상 패턴의 영향을 고려한 PSF(point-spread function)에 해당하는데, 본래 조명 동공의 모양이 $J(f, g)$ 였다면 다음 식($J(f, g)$ 와 PSF의 convolution)을 이용하여 후면 위상 패턴에 의해 변형된 조명 동공의 모양 $J'(f, g)$ 을 계산할 수 있다.

$$J'(f, g) = \iint_{NA\sigma} [J(f, g) \otimes PSF] dS \quad (4)$$

위 식에서 f 와 g 는 서로 수직방향으로의 공간주파수(spatial frequency)를 의미하며,^[6] NA는 투영광학계의 개구수(numerical aperture)를, σ 는 조명계의 공간 결맞음도(degree of spatial coherence)를 뜻한다. 그림 1에서 h 는 노광파장이 λ 일 때 굴절률 n_{Qz} 를 갖고 있는 석영(Qz, quartz) 재질의 마스크 후면에 180도의 상대 위상을 갖는 위상패턴을 형성하기 위해 식각해야 하는 깊이를 의미하며, m 은 위상패턴에 의한 광

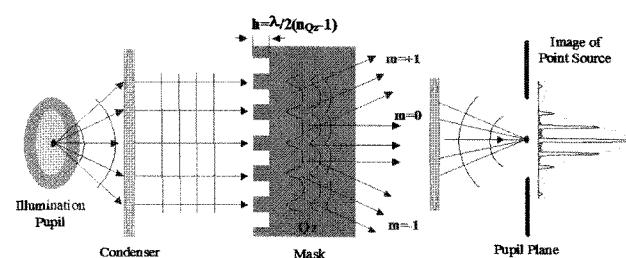


그림 1. 계산과정에 대한 설명도.

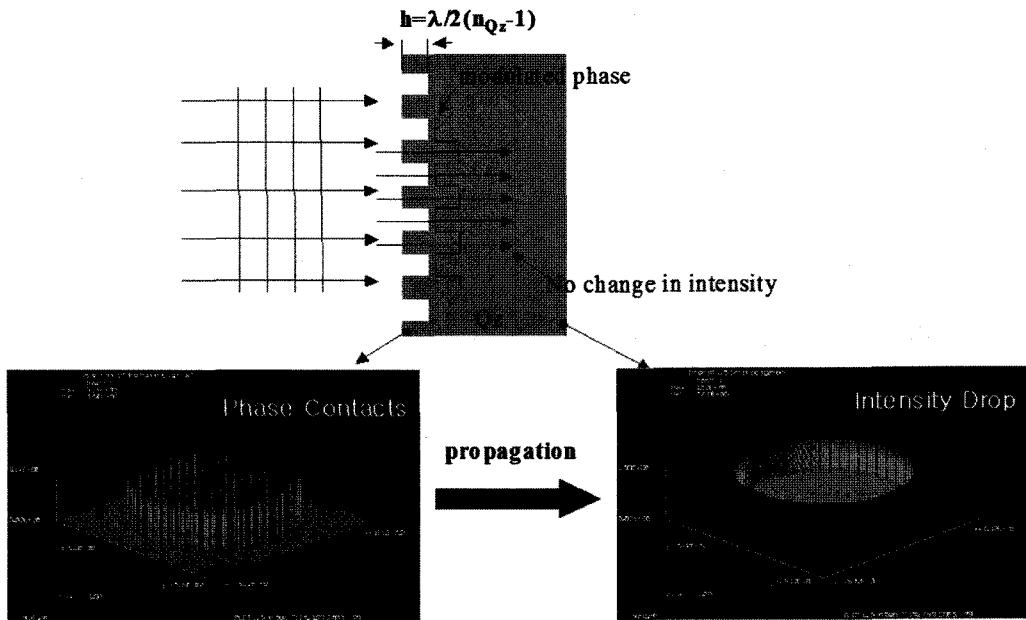


그림 2. 포토마스크의 후면 위상패턴에 의해 위상 변조된 광이 전면까지 진행한 후 광세기가 저하되고 있는 모습을 시뮬레이션한 결과.

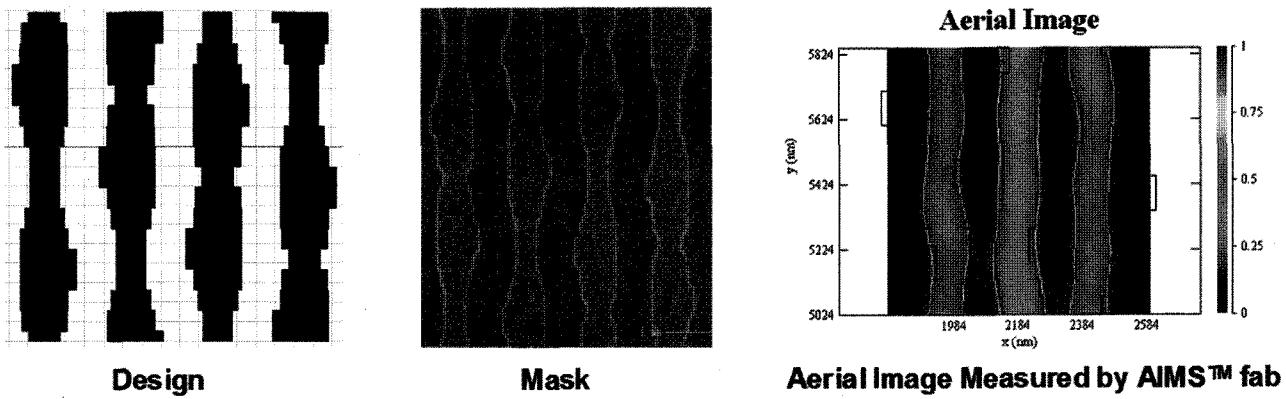


그림 3. 테스트 패턴으로 포토마스크 전면에 형성한 웨이브 타입의 게이트 패턴.

의 회절차수를 의미한다.

실제 계산 프로그램 코딩과 시뮬레이션은 상용 광학 시뮬레이션 툴인 GLAD Ver.4.1(Applied Optics Research)을 사용하여 수행하였다. 그림 2는 마스크 후면의 위상 패턴에 의해 마스크 전면에서 노광 광세기의 저하가 일어나는 것을 GLAD를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. 그림 2의 왼쪽은 마스크 후면에 형성한 위상 패턴에 의해 입사 광의 위상이 변조된 모습을 보여 주고 있고, 오른쪽은 위상 변조된 광이 마스크 전면까지 진행한 후 광세기가 저하되고 있는 모습을 보여 주고 있다. 마스크 두께 방향으로의 전파 거리는 6인치 표준 마스크의 두께인 6.35 mm이다.

III. 실험 및 결과

이론의 실험적 검증을 위해 테스트 마스크를 제작하였다. 마스크 전면에는 110 nm 디자인 룰의 웨이브 타입의 게이트

패턴을 형성하였으며, 마스크 후면에는 크기와 조밀도를 구역별로 변화시켜며 위상 콘택홀 패턴을 형성하였다. 측정에는 AIMS Fab(Carl Zeiss)을 이용하여 얻은 aerial 이미지의 첨두값을 사용하였다. 그림 3은 웨이브 타입의 게이트 패턴을 보여 주고 있다. 그림 3의 왼쪽은 패턴 디자인을, 중간은 마스크 상의 SEM(scanning electron microscope) 사진을, 오른쪽은 AIMS Fab을 이용하여 측정한 aerial 이미지를 각각 보여 주고 있다.

그림 4는 KrF 노광 파장에서 위상 콘택홀 패턴의 크기에 따른 노광 광세기 저하 기울기(SIID, slope of illumination intensity drop)에 대한 결과를 보여 주고 있다. 노광 광세기 저하 기울기는 위상 콘택홀 패턴의 패턴 조밀도 변화에 따른 노광 광세기(패턴 조밀도가 0인 경우에 대해 규격화됨) 변화 그래프를 선형 곡선 맞춤하여 얻은 직선의 기울기를 뜻한다. 노광조건은 0.8 NA/환상형(annular) (0.59 to 0.89 σ)이었다. 위상 콘택홀의 크기가 600 nm 이하일 때, 실험 데이터의 오

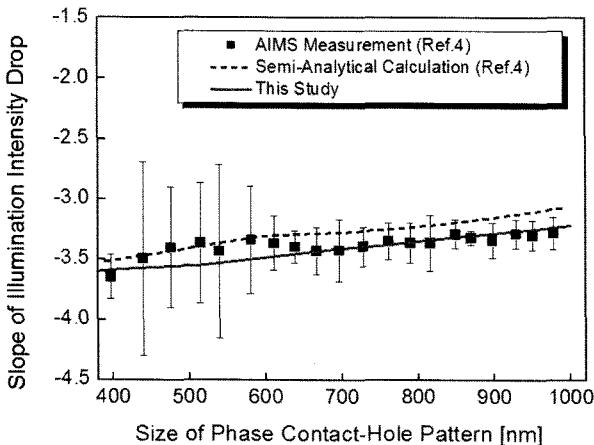


그림 4. 위상 콘택홀 패턴의 크기에 따른 노광 광세기 저하 기울기(SIID, slope of illumination intensity drop)에 대한 실험 및 이론적 결과 (노광조건 : KrF, 0.8 NA/환상형 (0.59 to 0.89 σ))

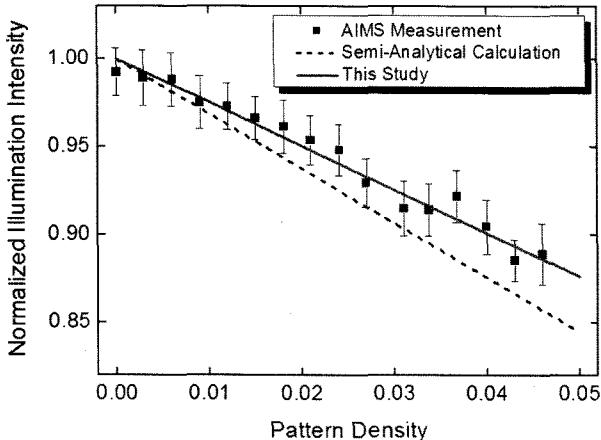


그림 5. 위상 콘택홀의 조밀도 변화에 따른 노광 광세기의 변화에 대한 실험 및 이론적 결과 (노광 조건 : ArF, 0.75 NA/환상형 (0.55 to 0.85 σ))

차가 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 테스트 마스크 제작에 사용한 위상 콘택홀 제작 공정(레이저 패턴 생성기 사용)의 한 계로 인해 마스크 후면에 제작된 위상 콘택홀의 크기 균일도가 크게 떨어지고 있기 때문이다. 준해석적 방법으로 계산된 결과와 본 논문의 이론적 방법을 사용하여 계산한 결과 모두 실험결과와 측정 오차 안에서 일치하고 있으며, 600 nm 이상의 위상 콘택홀 크기에 대해 두 이론적 방법 중 본 논문의 결과가 더 실현결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 ArF 노광 파장에서 위상 콘택홀의 조밀도 변화에 따른 노광 광세기의 변화에 대한 결과를 보여 주고 있다. 마스크 후면의 위상 콘택홀 크기는 약 800 nm 이었으며, 노광 조건은 0.75 NA/환상형 (0.55 to 0.85 σ)이었다. 실험적으로 측정된 SIID는 약 -2.4 이었으며, 준해석적 방법으로 계산한 결과는 약 -3.1, 본 논문의 이론적 방법을 사용하여 계산한 결과는 약 -2.5로 본 논문의 결과가 실험결과를 정확히

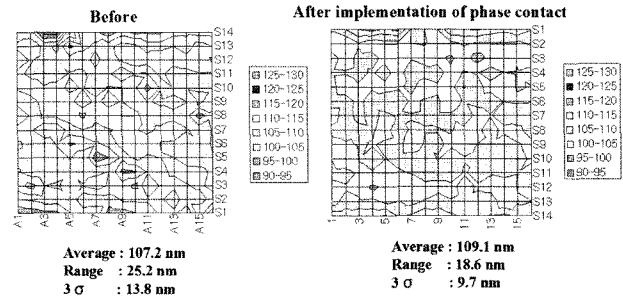


그림 6. 110 nm 디자인 룰을 갖고 있는 DRAM의 한 주요 레이어에 대해 CD 균일도 보정 기술을 적용하기 전과 적용한 후의 필드 내 CD 균일도 (노광 조건 : ArF, 0.75 NA/환상형 (0.55 to 0.85 σ))

게 재현하고 있음을 알 수 있다.

후면 위상 패턴에 의한 CD 균일도 향상 기술을 ArF 리소그래피에 적용하였다. 110 nm 디자인 룰을 갖고 있는 DRAM의 한 주요 레이어에 대해 적용하였으며, 노광 조건은 0.75 NA/환상형 (0.55 to 0.85 σ)이었다. 본 논문의 계산 결과에 따라 보정을 위한 SIID 값으로 -2.5를 사용하였다. 그림 6의 원편과 같이 보정 전 필드 내의 CD 분포는 평균 107.2 nm, 변동범위(range) 25.2 nm, 3 σ 13.8 nm 이었다. DL(dose latitude, %dose 변화당 CD 변화량)은 2.3 nm/%dose로 측정되었다. 보정을 수행한 후 그림 6의 오른편과 같이 필드 내의 CD 분포는 평균 109.1 nm, 변동범위 18.6 nm, 3 σ 9.7 nm 이었다. CD 균일도가 3 σ 값으로 13.8 nm에서 9.7 nm로 약 30% 개선되었음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 포토마스크 후면으로부터 주 패턴이 존재하는 포토마스크 전면까지의 광의 전파를 고려하기 위해 물리 광학의 회절이론에 근거한 모델링을 수행하고, 이 모델링을 이용하여 후면 위상 패턴의 크기와 조밀도에 따른 투과율 변화에 대한 계산을 수행하였다. 회절 계산법 중 가장 효과적이고도 정확한 해를 주는 것으로 알려진 각도 스펙트럼 접근법에 기반을 둔 스칼라 회절 이론을 적용하였으며, 상용 시뮬레이션 툴인 GLAD를 사용하여 시뮬레이션 프로그램을 코딩하였다. 준해석적 이론의 경우 ArF 노광 파장에서의 위상 패턴 조밀도에 따른 노광 광세기 변화에 대하여 실험결과와 실험오차 이상의 차이를 보였으나, 본 논문의 이론적 결과는 실험결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인하였다. KrF 노광 파장에 대한 결과에 있어서도 본 논문의 이론적 결과가 준해석적 이론보다 실험결과를 더욱 잘 재현하고 있는 것으로 확인되었다. 본 기술을 실제 ArF 리소그래피 공정에 적용하였으며, 보정기술 적용 후 CD 균일도가 향상되었음을 확인하였다.

이론적인 측면에서 DDM(dummy diffractive mask)을 사용한 투영시스템 분석을 위해 체계화된 aerial 이미지 계산법

[7,8]이 가장 완벽한 이론적 틀을 제공할 수 있을 것으로 사료되며, 이에 대한 연구가 진행 중에 있다. 공정적인 측면에서 후면 위상 패턴을 이용한 투과율 조절 포토마스크 제작은 크롬 식각 공정이 석영 식각 공정으로 대체되었을 뿐, 이진 마스크(binary mask)의 제작 공정과 동일하며, 매우 번거로운 단계 공정이다. 투과율 조절 포토마스크 제작 공정의 단순화 방안으로 극초단 레이저를 이용한 포토마스크의 투과율 조절 방법이 적극적으로 시도되고 있다.^[9,10] 펌토초에서 피코초 사이의 극초단 레이저 팰스를 포토마스크 내부에 접속시켜 포토마스크 내부에 일종의 부피 홀로그램을 형성하여 원하는 투과율 분포를 단일 공정으로 구현하고자 하는 시도이다. 극초단 레이저의 조사에 의한 포토마스크 기저 매질 석영의 광학적 특성 변화에 대한 체계적 연구가 추가적으로 수행된다면, 본 논문의 연구 결과를 곧바로 적용하여 극초단 레이저를 이용한 투과율 조절 포토마스크에 대한 이론적 기반이 확립될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-003-C00080).

참고문헌

- [1] ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) 2006 Update: <http://public.itrs.net/>.
- [2] J. van Schoot, O. Noordman, P. Vanoppen, F. Blok, D. Yim, C.-H. Park, B.-H. Cho, T. Theeuwes, and Y.-H. Min, "CD Uniformity Improvement by Active Scanner Corr-
- [3] J. R. Park, S.-W. Choi, G.-S. Yeo, and S. H. Jang, "Photomask Having a Transparency-Adjusting Layer, Method of Manufacturing the Photomask, and Exposure Method Using the Photomask", U. S. Patent 7001697, 2006.
- [4] J. R. Park, S. H. Kim, J.-H. Park, D. G. Lee, S.-Y. Kim, B.-C. Cha, and S.-W. Choi, "Correction of Critical Dimension Uniformity on a Wafer by Controlling Backside Transmittance Distribution of a Photomask," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 9A, pp. 6012-6019, 2004.
- [5] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics* (McGraw-Hill, Singapore, 1996), Chap. 3.
- [6] A. K. Wong, *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography* (SPIE Press, Washington, USA, 2001), Chap. 2.
- [7] H. J. Yoo, Y.-H. Oh, B.-S. Park, S. S. Choi, Y. J. Jeon, C. Lee, and S.-C. Park, "Lithographic Performance Enhancement Using Dummy Diffraction Mask," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 12B, pp. 5903-5908, 1993.
- [8] D. Yim, S. Lee, S. Lee, Y.-H. Oh, H. B. Chung, and H. J. Yoo, "Effect of Degree of Coherence in Optical Lithography Using Dummy Diffraction Mask," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 2A, pp. 780-785, 1996.
- [9] 김순호, 최성운, 문성용, 박진홍, "광학 장치 및 이의 제조 방법", 대한민국특허 등록번호 10-0555531, 2006.
- [10] E. Zait, V. Dmitriev, S. Oshemkov, G. Ben-Zvi, D. Michaelis, "CD Variation Correction by Local Transmission Control of Photomasks Done with a Novel Laser Based Process," in *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX*, Chas N. Archie, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 6152, pp. 615225-1-615225-6, 2006.

Application of Transmittance-Controlled Photomask Technology to ArF Lithography

Dong Gun Lee

Samsung Electronics Co., LTD., San #24 Nongseo-Ri, Giheung-Eup, Yongin, Gyeonggi-Do 449-711, Korea

Jong Rak Park[†]

Department of Photonic Engineering, Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

[†]E-mail: ejrpark@chosun.ac.kr

(Received January 9, 2007, Revised manuscript February 21, 2007)

We report theoretical and experimental results for application of transmittance-controlled photomask technology to ArF lithography. The transmittance-controlled photomask technology is thought to be a promising technique for critical dimension (CD) uniformity correction on a wafer by use of phase patterns on the backside of a photomask. We could theoretically reproduce experimental results for illumination intensity drop with respect to the variation of backside phase patterns by considering light propagation from the backside to the front side of a photomask at the ArF lithography wavelength. We applied the transmittance-controlled photomask technology to ArF lithography for a critical layer of DRAM (Dynamic Random Access Memory) having a 110-nm design rule and found that the in-field CD uniformity value was improved from 13.8 nm to 9.7 nm in 3σ .

OCIS code : 220.3740, 220.4000, 260.1960.