

論文98-35D-2-9

싱크로트론 X선 근접 리소그래피에 의하여 전사되어진 라인의 폭에 · 대한 에어리얼 이미지 시뮬레이션

(Aerial Image Analysis of Replicated Linewidths Patterned by Synchrotron X-ray Proximity Lithography)

李在雄*, 徐容德**, 金五顯**, 崔普景***, 金熙相***

(Ja-Woong Lee, Yong-Duck Seo, Bo-Kyoung Choi, Oh-Yun Kim,
and Heesang Kim)

요 약

싱크로트론 X선 근접 리소그래피 시스템을 위한 에어리얼 이미지 시뮬레이터를 개발하였다. Partially coherent한 특성을 갖는 싱크로트론 X선의 회절현상으로 형성되는 에어리얼 이미지를 계산하기 위하여 모드 전개법(modal expansion)과 Rayleigh -Sommerfeld 회절이론을 이용하였다. PALC(POSTECH Advanced Lithography Center) 리소그래피 시스템에 의한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 전사되어진 라인의 폭에 대한 실험값과 이론값은 5% 정도 미만의 상대오차로 일치하였다. 전사되어진 라인의 폭을 분석함으로써 X선의 발산각을 결정하는 방법을 제시하였다.

Abstract

An aerial image simulator for the synchrotron X-ray proximity lithography system has been developed. The modal expansion method and Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory are used in calculating the aerial image which is formed by diffracting of the partially coherent X-ray. Experimental results of PALC(POSTECH Advanced Lithography Center) lithography system and simulated results are compared. The experimental and theoretical values of the width of replicated lines are consisted with the relative error less than ~5%. The method to determine the divergent angle of X-ray from the analysis of the width of replicated lines is given.

I. 서론

* 正會員, 順天大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Sunchon National University)

** 正會員, 浦港工科大學校 電子電氣工學科

(Dept. of Electronic and Electrical Eng., POSTECH)

*** 正會員, LG 半導體 株式會社 中央研究所

(RND Division, LG Semicon Co.,Ltd.)

※ 본 연구는 LG 반도체 주식회사 기반기술연구소
지원으로 수행하였음.

接受日字:1997年7月3日, 수정완료일:1998年2月9日

고집적 반도체회로의 집적도를 증가시키는 데 있어서 병목이 되고 있는 핵심기술이 리소그래피이다. CD(Critical Dimension)이 0.17 μm 이하(1G DRAM 급 이상)의 고집적 반도체회로의 제작을 위하여는 기존의 광리소그래피는 빛의 회절현상에 의한 분해능(resolution)과 초점심도(depth of focus)에 있어서 한계에 이르고 있다. 따라서 DUV(Deep Ultra Violet; $\lambda=193\text{ nm}$) 또는 EUV(Extreme Ultra Violet; $\lambda=13\text{ nm}$)를 이용한 광리소그래피(projection

optical lithography), E-빔(electron beam)리소그래피, X선($\lambda=1$ nm) 근접(proximity) 리소그래피등이 경쟁적으로 연구개발되고 있다^[1]. X선 근접 리소그래피는 프로젝션에 의한 이미지 축소형이 아니고 평행광의 조사에 의한 1:1 이미지(엄밀하게는 shadow)를 이용하므로 신뢰성이 있는 1× 마스크 제작이 필요한 어려움이 있으나, 분해능 및 대량생산(throughput)면에서 매우 유망한 기술이다^[2,3].

X선 근접 리소그래피에 대한 연구는 1972년 Spears와 Smith의 논문이 발표된 이래 미국, 일본 등지의 선진국에서는 20여년간 연구되어 왔다^[4]. 1980년대 초에 싱크로트론(synchrotron) X선 광원을 이용하게 됨으로써, X선 리소그래피의 혁신적인 발전이 이루어졌다. 싱크로트론 X선 광원은 빛의 세기가 충분하여 대량생산을 가능하게 하고, 점광원과는 달리 평행성이 강한 빛이므로 blurring 및 run-out error 관점에서 볼 때 우수하다. 또한 빛의 파장영역이 넓기 때문에 최적의 파장영역을 선택할 수 있는 이점이 있다. 국내에서는 포항공과대학교 방사광 가속기 연구소에 PLS(POSTECH Light Source) 싱크로트론이 완성되어서 싱크로트론 X선 리소그래피를 위한 광원이 확보됨에 따라, 1994년부터 PALC(POSTECH Advanced Lithography Center)를 중심으로 싱크로트론 X선 근접 리소그래피에 대한 연구가 진행중이다^[5].

X선 리소그래피 시스템을 개발함에 있어서 실험 시스템을 임의로 수정 변경하는 것은 어려울 뿐만 아니라 시간과 비용이 막대하게 소모되므로, 실험결과의 분석 및 모의 실험을 위한 시뮬레이터의 개발은 필수적이다. 본 논문에서는 싱크로트론 X선 근접 리소그래피 시스템에서 에어리얼 이미지(aerial image)를 계산하기 위한 시뮬레이터 개발에 관한 내용을 다루었다. 에어리얼 이미지는 웨이퍼의 레지스트 면에 맺히는 빛의 세기 분포인데, X선의 회절현상에 의하여 마스크의 패턴과는 다른 변형된 모습을 갖는다. 제 II장에서는 에어리얼 이미지 계산을 위한 이론을 서술하였고, 제 III장에서는 에어리얼 이미지 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였으며, 제 IV장에서는 결론을 서술하였다.

II. 이론

PALC에서 개발하고 있는 싱크로트론 X선 리소그

래피 시스템의 개념도는 그림 1 과 같다.

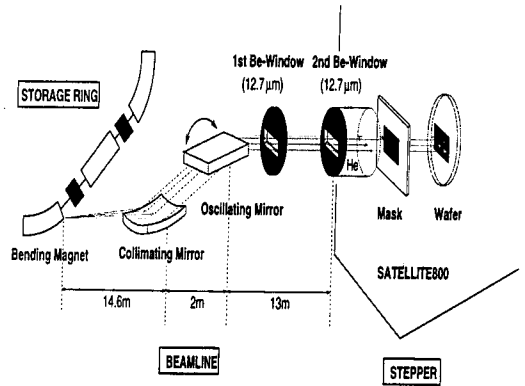


그림 1. PALC 싱크로트론 X선 근접 리소그래피 시스템 개략도

Fig. 1. Schematic of PALC synchrotron X-ray proximity lithography system.

싱크로트론에서 방출된 X선이 빔라인을 거쳐 마스크면에 도달할 때, 싱크로트론 X선 광원의 partially coherent 특성과 더불어 빔라인의 평행광 거울(collimating mirror) M1 및 오실레이팅 거울(oscillating mirror) M2의 기하광학적 작용을 고찰하면, 마스크면에서 빛의 세기의 공간적인 분포는 균일하게 되고, 진행방향의 분포는 가우시안(Gaussian) 분포를 갖게 된다. 즉 마스크면에서 X선의 밝기함수(brightness function) B는 다음 식으로 주어진다⁶⁻⁸.

$$B_M(x, y, s_x, s_y, \nu) = \Phi_M(\nu) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{sx}} \exp\left[-\frac{(s_x - \frac{x}{q})^2}{2 \sigma_{sx}^2}\right] \times \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{sy}} \exp\left[-\frac{s_y^2}{2 \sigma_{sy}^2}\right] \quad (1)$$

식(1)에서 σ_{sx} , σ_{sy} 는 각각 x축, y축 방향으로의 빛의 발산각 표준편차이다. x축은 싱크로트론 링 오르비탈면에 수직방향, y축은 수평방향, z축은 빔라인의 광축 방향이다. q는 거울 M2와 마스크면 사이의 거리이다. $\Phi_M(\nu)$ 는 빛의 스펙트럼으로

$$\Phi_M(\nu) = T_{mb}(\nu) T_{He}(\nu) T_{W2}(\nu) T_{W1}(\nu) R_{M2}(\nu) R_{M1}(\nu) \times \sqrt{\frac{3}{c}} i s_0 \gamma \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\frac{\nu}{\nu_c}}^{\infty} dt K_{\frac{5}{3}}(t) \quad (2)$$

으로 주어진다^[8,9]. 여기서 R_{M1} , R_{M2} 는 거울 M1,

M2의 반사율, T_{w1} , T_{w2} , T_{He} , T_{mb} 는 각각 두 개의 Be 윈도우, He 챔버, 마스크 멤브레인의 투과율이다. e 는 전자의 전하량의 크기이고, c 는 진공에서 빛속도, i 는 싱크로트론의 전자빔 전류, s_0 는 링 오르비탈에 평행인 방향의 열린 슬릿(openning slit)에 의하여 제한되는 acceptance angle 이다. $v=E/m_0c^2$ 이고, E 는 싱크로트론 전자의 운동에너지이다. 특성주파수(critical frequency) $\nu_c = 3v^3c/4\pi\rho$ 이고, ρ 는 싱크로트론 마그네트의 bending radius 이다. $K_{5/3}$ 는 차수가5/3인 third kind modified Bessel 함수이다.

싱크로트론 X선 광원은 partially coherent한 성격을 가진다. 이러한 성질의 빛이 마스크와 웨이퍼 사이의 광학적 매질을 진행하여 레지스트면에 이미지를 형성하는 현상을 효율적으로 다룰수 있는 방법이 모드 전개법(modal expansion)이다. 레지스트면의 (x,y) 점에서 주파수가 ν 이고 진행방향이 (s_x, s_y) 인 빛 즉, (s_x, s_y, ν) 모드 빛의 전계를 $U_w(x, y, s_x, s_y; \nu)$ 라고 하면, 레지스트면의 빛의 세기 분포인 에어리얼 이미지는 다음과 같이 계산된다^[6,7,10,11].

$$I_w(x, y) = \int d\nu \int ds_x ds_y \frac{1}{\sqrt{1-s_x^2-s_y^2}} U_w(x, y, s_x, s_y; \nu) U_w^*(x, y, s_x, s_y; \nu) \quad (3)$$

그리고, $U_w(x, y, s_x, s_y; \nu)$ 는

$$U_w(x, y, s_x, s_y; \nu) = \int \int dx' dy' K_G(x, y, x', y'; \nu) \times \left\{ \int \int dx'' dy'' K_M(x', y', x'', y''; \nu) \times \exp\left[j\frac{2\pi\nu}{c}(x''s_x + y''s_y)\right] \sqrt{B_M(x'', y'', s_x, s_y; \nu)} \right\} \quad (4)$$

식(4)에서 K_M 과 K_G 는 마스크 커널(kernel)과 갭 커널이다.

파장이 1 nm 정도인 X선 영역에서 마스크 흡수체에 의한 빛의 전계의 변화를 엄밀하게 계산하는 것은 쉽지 않다. 그동안 몇가지 방법이 시도되었으나 정확도와 컴퓨팅 시간면에서 비교적 만족스러운 방법이 흡수체에서의 빛의 진행을 perturbation 방법으로 다룬 BPM(Beam Propagation Method)이다^[6,12,13]. 그러나, 마스크와 웨이퍼 사이 갭의 길이가 10 μm 이상인 경우에는 흡수체의 복소수 굴절률에 의한 빛의 감쇄 및 상대적인 위상차만을 고려하고 흡수체를 지나는 동안의 회절현상은 무시하는 간단한 계산 방법(편의상 simple method, SM 으로 지칭하기로 함)으로도 비

교적 정확한 에어리얼 이미지 계산결과를 얻을 수 있다^[13,14]. 갭의 길이가 20 μm 이상인 경우에는 BPM 과 SM 두방법에 의한 계산의 정확도에 실질적인 차이가 없다. 컴퓨팅 시간면에서 SM이 유리하다. 리소그래피 시스템의 양산성을 고려할 때 현재로서는 갭의 길이가 20 μm 정도 이상인 것이 바람직하다. 본논문에서는 SM을 이용하였다. 이 때 마스크 커널 K_M 은 다음과 같이 주어진다^[6,7].

$$K_M(x, y, x', y'; \nu) = \exp[-0.5a(\nu)t(x, y)] \exp[-0.5a_0(\nu)(t_s - t(x, y))] \times \exp\left[j\frac{2\pi\nu}{c}n(\nu)t(x, y)\right] \exp\left[j\frac{2\pi\nu}{c}n_0(\nu)(t_s - t(x, y))\right] \delta(x-x', y-y') \quad (5)$$

식(5)에서 $a(\nu)$, $n(\nu)$ 는 각각 흡수체의 광흡수계수와 실수 굴절률이고, $a_0(\nu)$, $n_0(\nu)$ 는 갭에 채워져 있는 가스의 광흡수계수와 실수 굴절률이다. t_s 는 흡수체의 최고 두께이고, $t(x, y)$ 는 (x, y) 점에서 흡수체의 두께이다.

마스크의 흡수체를 지난 후에 웨이퍼의 레지스트면까지의 갭에서는 빛이 균일한 매질을 진행한다. 이 때 레지스트면에 맺히는 에어리얼 이미지는 마스크 흡수체 바로 다음을 지나는 평면에서의 빛의 세기 분포를 경계조건으로 하는 균일매질에서의 Rayleigh-Sommerfeld 회절이론을 적용하여 계산한다. Rayleigh-Sommerfeld 회절이론에 의한 갭 커널은 다음과같이 주어진다^[6,7,15].

$$K_G(x, y, x', y'; \nu) = \left(\frac{\nu}{jc} - \frac{1}{2\pi R}\right) \sqrt{1-s_x^2-s_y^2} \frac{\exp\left(j\frac{2\pi\nu}{c}R\right)}{R} \quad (6)$$

$$R = \sqrt{g^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2} \quad (7)$$

식 (7)에서 g 는 갭의 길이이다. 갭 커널 $K_G(x, y, x', y')$ 는 $K_G(x-x', y-y')$ 의 형태를 갖고 있다.

따라서 식(4)에서 갭 커널의 작용은 수식적으로 $K_G(x, 0, y, 0)$ 와의 convolution이 된다. 위의 convolution 계산은 직접 공간상에서 행하는 것보다, FFT 를 이용하여 공간주파수(spatial frequency)영역으로 변환하여 두 함수의 곱을 계산한 후에 다시 역 FFT를 행하여 계산하는 것이 빠르고 효율적이다. 갭커널 K_G 의 공간주파수 푸리에변환 K_{GF} 는 다음과 같이 주어진다^[6,7,15].

$$K_{GF}(f_x, f_y; \nu) = \int dx dy \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] K_G(x, 0, y, 0; \nu) = \exp\left[j2\pi g \sqrt{\left(\frac{\nu}{c}\right)^2 - f_x^2 - f_y^2}\right] \quad (8)$$

III. 실험 및 시뮬레이션

제 2장에서 서술한 이론을 바탕으로 에어리얼 이미징 시뮬레이터를 개발하였다. 본 장에서는 개발된 시뮬레이터에 의한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교 검토하였다.

PALC 리소그래피 시스템이 이용하는 X선 광원은 싱크로트론의 전자 에너지 E는 2 GeV, 전자빔 전류 i는 100 mA, ν 는 3914, ν_c 는 6.81×10^{17} Hz이다. 빔 라인에서 s_0 는 3.3 mrad 이고, Au 코팅 평행광 거울과 Pt 코팅 오실레이팅 거울에 대한 X선의 입사각은 88.25° 이다. 두개의 Be 창 두께는 각각 12.7 μm , He 챔버의 길이는 50 cm, Si_3N_4 마스크 멤브레인의 두께는 2 μm 이다. 이 때, 식 (1)에서 $\Phi_M(\nu)$ 으로 표현된 빛의 스펙트럼 분포는 식 (2)에 의하여 쉽게 계산이 된다. 그러나, 식 (1)에서 X선의 발산각 표준편차 σ_s (σ_{sx} 또는 σ_{sy})는 싱크로트론 소스의 특성과 빔라인 광학계의 여러 요인에 따라 정해지는 값으로서 그 값의 직접적인 측정이나, 추정이 용이하지 않다. 본 논문에서는 다음과 같은 과정으로 그 값을 간접적으로 추정하였다.

웨이퍼에 전사된 라인(line)의 폭 W(width)는 X선의 노광량(D)에 따라서 변화한다. 그 이유는 에어리얼 이미지의 모습으로부터 자명하다. 라인의 에어리얼 이미지 계산결과의 예는 그림 2와 같다. 그림 2(a)는 CD 0.316 μm 라인에 대한 마스크 흡수체의 모습과 에어리얼 이미지 계산결과이다. 그림에서와 같이 라인의 CD 및 흡수체 측면의 경사도 WS(wall slop)를 정의하였다. 흡수체의 재질은 Ta이고 두께는 0.4 μm 이다. 그리고 마스크와 웨이퍼 사이 갭의 길이는 현재의 PALC 스테퍼에서는 27 μm 로 설정되어 있다. 노광량이 변하여도 에어리얼 이미지의 상대적인 모습은 변하지 않는다. 단지 노광량에 따라 디벨로핑(developing)시에 디벨로핑 문턱레벨(threshold level)의 위치가 달라진다. 예로서 노광량 D1과 D2에 따른 디벨로핑 문턱레벨이 표시되어 있다. D2가 D1보다 노광량이 큰 경우이다. 에어리얼 이미지 모습으로부터 노광량 D에 따라 전사되어 지는 라인의 폭이 변화하는 이유를 쉽게 알 수 있다. 그리고, 노광량에 따른 폭의 변화를 선형적으로 근사화 할 수 있는 범위가 존재한다. 그림 2(b)는 몇 쌍의 σ_s 및 WS에 대한 라인의 에어리얼 이미지 계산결과들이다. 에어리얼 이미지의

모습 자체가 σ_s 및 WS에 따라 변화하기 때문에, 노광량 D에 따른 폭 W의 변화율 dW/dD 는 σ_s 및 WS와 밀접한 관계를 갖게 된다. 따라서 아래의 과정을 통하여 σ_s 와 WS의 값을 정한다.

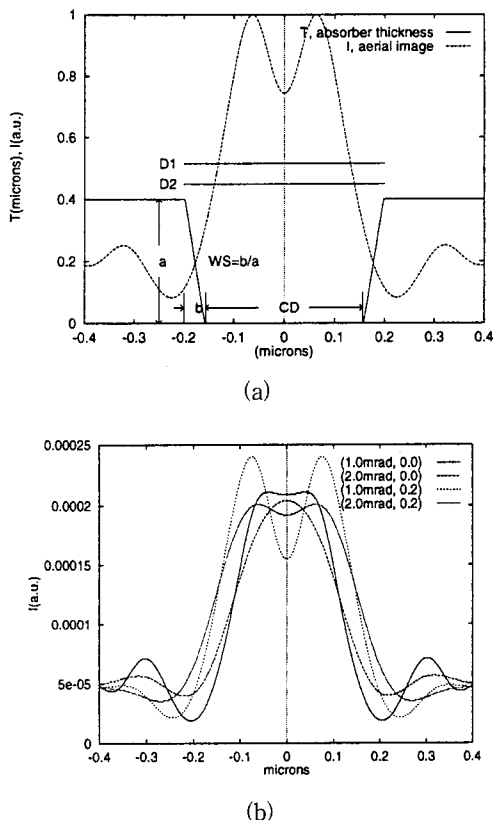


그림 2. 라인의 에어리얼 이미지 CD=0.316 μm , 흡수체 Ta 두께=0.4 μm , 갭=27 μm
 (a) 마스크 흡수체 모습과 에어리얼 이미지. $\sigma_s = 1.0$ mrad, WS= 0.1 (b) (σ_s , WS)에 따른 에어리얼 이미지

Fig. 2. Aerial image of a line. CD=0.316 μm , absorber Ta thickness=0.4 μm , gap=27 μm
 (a) Shape of mask-absorber and aerial image. $\sigma_s=1.0$ mrad, WS=0.1 (b) Aerial image versus (σ_s , WS)

첫째, 주어진 CD의 라인에 대하여 노광량 D를 변화시키면서 전사된 라인의 폭 W를 측정하여 dW/dD 를 구한다. CD 0.316 μm 라인에 대한 실험결과는 그림 3과 같다. 실험에 사용한 PR(photoresist)는 N9 네거티브 PR이다. 그림 3에서 직선은 측정값들에 의한 선형피팅(linear fitting) 결과이다. 직선의 기울기 즉, dW/dD 의 실험 값이 $7.87 \times 10^{-6} \mu\text{m}/(\text{mA} \cdot \text{sec})$ 으로 계산된다.

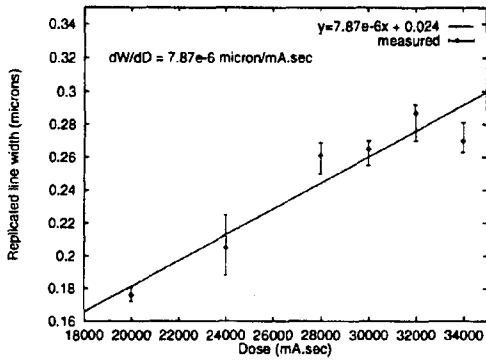


그림 3. 노광량에 따른 라인 폭의 변화. CD=0.316 μ m, 흡수체 Ta 두께=0.4 μ m, 갭=27 μ m
 Fig. 3. Variation of line width versus exposure. CD=0.316 μ m, absorber Ta thickness=0.4 μ m, gap=27 μ m.

둘째, σ_s 와 WS 값을 변화시키면서 에어리얼 이미지를 계산하고, 그로부터 dW/dD 를 구한다. 에어리얼 이미지로부터 라인의 폭을 결정할 때는 디벨로핑 문턱 조건을 기준으로 on-off 방식으로 디벨로핑됨을 가정하였다. 그리고, 그 값이 실험치와 일치하는 σ_s 와 WS의 쌍 (σ_s , WS)를 찾아낸다. CD 0.316 μ m 라인에 대한 dW/dD 계산결과는 그림 4와 같다. dW/dD 의 실험값인 $7.87 \times 10^{-6} \mu\text{m}/(\text{mA} \cdot \text{sec})$ 와 일치하는 결과를 줄 가능성이 있는 (σ_s , WS)는 $dW/dD = 7.87 \times 10^{-6} \mu\text{m}/(\text{mA} \cdot \text{sec})$ 를 나타내는 수평선과 각각 그래프들의 교점들로서 무수히 많을 수 있다. 그림 4에는 A(1.2 mrad, 0.3), B(2.1 mrad, 0.2), C(2.5 mrad, 0.1), D(2.8 mrad, 0.0) 네쌍이 명시되어 있다.

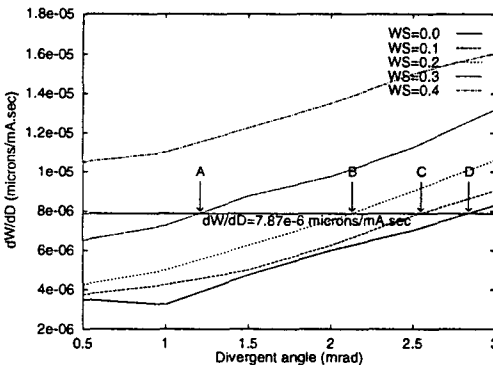


그림 4. (σ_s , WS)에 따른 dW/dD CD=0.316 μ m, 흡수체 Ta 두께=0.4 μ m, 갭=27 μ m
 Fig. 4. dW/dD versus (σ_s , WS). CD=0.316 μ m, absorber Ta thickness=0.4 μ m, gap=27 μ m.

세째, 위에서 찾아낸 가능성이 있는 (σ_s , WS)중에서 실제의 실험시스템의 값을 확정하기 위하여는 다음과 같은 방법으로 실험과 이론계산 결과를 비교한다. X선의 노광량 D를 고정시키고, 각각 CD가 다른 라인들의 전사되어진 폭 W의 실험값들을 측정한다. 역시 노광량 D를 고정시키고 가능성이 있는 (σ_s , WS)에 대하여 에어리얼 이미지 계산으로부터 각각 CD가 다른 라인들의 폭 W의 이론값들을 계산한다. 실험값들과 이론값들이 가장 잘 일치하는 (σ_s , WS)값을 찾는다. 그림 5는 노광량 D가 30000 mA·sec 일 때 그림 4에서 찾은 네쌍의 (σ_s , WS)에 대한 이론계산값과 실험값의 비교이다. 네쌍중 (σ_s , WS)가 (1.2 mrad, 0.3)일 때가 가장 잘 일치하고 있다.

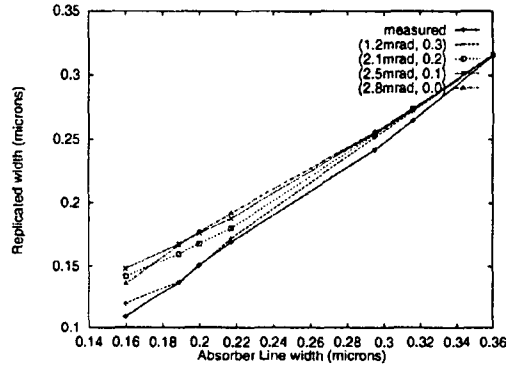


그림 5. 라인 폭의 실험값 및 이론값. 흡수체 Ta 두께=0.4 μ m, 갭=27 μ m, 노광량 D=30,000 mA·sec
 Fig. 5. Experimental and theoretical values of line width. absorber Ta thickness=0.4 μ m, gap=27 μ m, exposure D= 30,000 mA·sec

위와 같은 과정을 세밀하게 반복하여 (1.2 mrad, 0.3)인 근처에서 (σ_s , WS)값을 찾으면 그 값은 (0.8 mrad, 0.32)이다. PALC가 사용하는 포항 방사광 가속기의 11B 포트(port)의 경우 이론적인 σ_s 값은 약 0.3 mrad이다. 그러나 빔라인 및 여러 광학장치 오차나 불완전한 특성, 또는 시스템 동작시 여러 원인에 의해 생길 수 있는 진동 등의 영향으로 0.8 mrad 정도의 σ_s 값을 가진다고 볼 수 있다. WS의 경우에도, 라인의 크기가 작아질수록 마스크 측면의 부분적인 굴곡이 심해지고, 경사가 전체적으로 일정하다고 볼 수 없으므로 그 정도를 정확히 측정하기 어렵다. 그러나 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이, 이 같은 두 변수를 이용한 에어리얼 이미지 계산으로, CD 0.36 μ m부터 0.16

μm 의 넓은 범위에서 약 5% 이하의 오차로 실험결과와 일치시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서 전개한 이론 식들은 X선 소스로부터 웨이퍼 위의 레지스터 사이에 일어나는 광학 현상들을 상당히 간략화 했음에도 불구하고, 현재 개발된 PALC의 싱크로트론 근접 리소그래피의 이미지 형성 및 그로 인한 결과들을 분석하는 데 있어서 만족할 만한 정확도를 가진다. 실험에서 실제 전사된 라인들의 CD는 설계된 CD보다 작게 나왔다. 그 원인은 주로 X선의 회절에 기인한 것임을 알 수 있다.

영역에서 이론에 의한 라인 폭의 계산 값들을 제시하였다. 에어리얼 이미지 이론 계산에 의하면 CD 0.2 μm 이하인 영역에서는 전사되는 라인 폭의 CD에 따른 변화가 CD 0.2 μm 이상인 영역보다 완만해짐을 예측할 수 있다. 그림 6(b)로부터 노광량 D가 30000 $\text{m} \cdot \text{A} \cdot \text{sec}$ 일 때 원하는 라인 폭을 얻기 위한 라인 바이어싱(line biasing)을 결정할 수 있다. 예를 들어 0.15 μm 라인을 얻기 위하여는 마스크 흡수체의 CD를 0.2 μm 로 설계해야 함을 알 수 있다. 즉, +50 nm 의 라인 바이어싱이 필요하다. 이와 같이 에어리얼 이미지 계산으로부터 얻어지는 결과들은 실험 결과를 해석하거나 실험을 설계하는데 있어서 매우 유용하다.

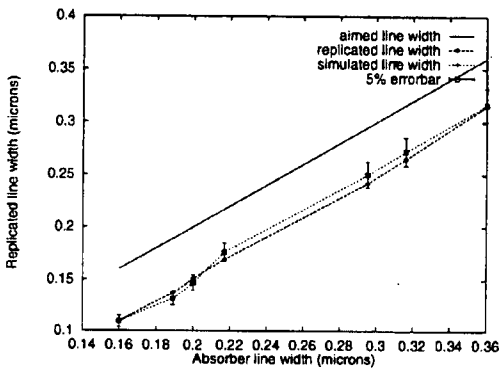
IV. 결론

PALC 싱크로트론 X선 근접 리소그래피 시스템에서 에어리얼 이미지를 계산하기 위한 이론 식들을 제시하고 그것을 이용하여 시뮬레이터를 개발하였다. Partially coherent한 특성을 갖는 싱크로트론 X선의 회절현상은 모드 전개법(modal expansion)과 Rayleigh-Sommerfeld 회절이론으로 다루었다. 마스크 흡수체에서는 X선의 감쇄와 위상변화를 고려하였다.

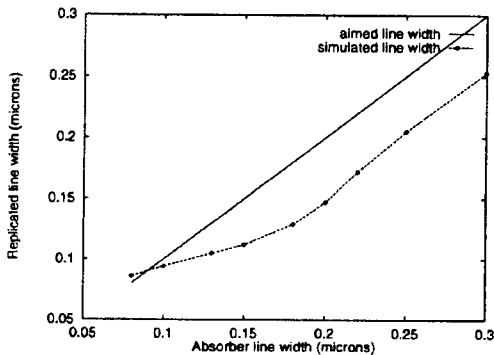
PALC 리소그래피 시스템에 의하여 전사된 라인들의 폭에 대한 실험값과 에어리얼 이미지 시뮬레이션에 의한 이론값을 비교 분석하였다. 다양한 CD에 대한 라인 폭의 실험값들과 이론값들이 상대오차 약 5% 이내로 잘 일치하고 있다. 특히, 본 논문에서는 전사된 라인의 폭이 노광량과 CD에 따라 변화하는 것을 분석함으로써, X선의 발산각을 추정하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 개발한 에어리얼 이미지 시뮬레이터는 실험결과를 해석하거나, 다양한 모의실험 계산을 통하여 싱크로트론 X선 근접 리소그래피 시스템을 최적화시키는데 있어서 매우 유용하리라 판단된다.

참고 문헌

- [1] L. Geppert, "Semiconductor lithography for the next millennium", *IEEE Spectrum*, pp. 33-38, Apr. 1996.
- [2] Sunao Ishihara, "The development of SOR lithography technology", *전자공학회지* 제



(a)



(b)

그림 6. 라인 폭. $\sigma_s=0.8$ mrad, $WS=0.32$, 흡수체 Ta 두께=0.4 μm , 갭=27 μm , 노광량 $D=30,000$ $\text{mA} \cdot \text{sec}$ (a) $CD > 0.16$ μm 영역에서 실험값 및 이론값 (b) $0.07 \mu\text{m} \leq CD \leq 0.3 \mu\text{m}$ 영역에서 이론에 의한 예측

Fig. 6. Line width. $\sigma_s=0.8$ mrad, $WS=0.32$, absorber Ta thickness=0.4 μm , gap=27 μm , exposure $D=30,000$ $\text{mA} \cdot \text{sec}$ (a) Experimental and theoretical values in $CD > 0.16 \mu\text{m}$ (b) Theoretical expectation in $0.07 \mu\text{m} \leq CD \leq 0.3 \mu\text{m}$.

그림 6(b)에는 CD 0.3 μm 부터 0.07 μm 까지의

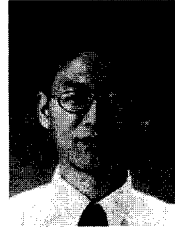
- 22권 제2호, pp. 149-162, Feb. 1995.
- [3] Henry I. Smith, "100 years of x rays: Impact on micro- and nanofabrication", *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B13, pp. 2323-2328, Nov./Dec. 1995
- [4] D. L. Spears and H. I. Smith, "High precision pattern replication using soft X-rays", *Electron. Lett.*, vol. 8, no.4 pp. 102-104, 1972.
- [5] 김오현,이기봉,리승유,최보경,Q. Wang, 이문석,강태희 "차세대 노광기술(X선) 공정개발", LG 반도체주식회사 연구보고서, Nov. 1995.
- [6] J. Z. Y. Guo and F. Cerrina, "Modeling X-ray proximity lithography", *IBM J. Res. Develop.*, vol. 37, no. 3, pp. 331-349, May 1993.
- [7] 이재웅,김희상, "X선 노광기술 시뮬레이터 개발: Theory of aerial image simulation of synchrotron X-ray proximity lithography", 포항공과대학교 차세대(X선) 노광기술 연구센터연구보고서, May, 1996
- [8] G. Margaritondo, *Introduction to Synchrotron Radiation*, Oxford Univ. Press, p. 26, 1988.
- [9] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley & Sons, p. 672, 1975.
- [10] B. E. A. Saleh and M. Rabbani, "Simulation of partially coherent imagery in the space and frequency domains and by modal expansion", *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 15, pp. 2770-2777, Aug. 1982.
- [11] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pregamon Press, p. 491, 1980.
- [12] J. van Roey, J. van der Donk, and P. E. Lagasse, "Beam-propagation method: analysis and assessment", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 71, no. 7, pp. 803-810, July 1981.
- [13] M. L. Schattenburg, K. Li, R. T. Shin, J. A. Kong, D. B. Olster, and Henry I. Smith, "Electromagnetic calculation of soft x-ray diffraction from 0.1- μ m scale gold structures", *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B9, pp. 3232-3236, Nov./Dec. 1991
- [14] J. Z. Y. Guo, "Image formation in X-ray lithography", PhD thesis, Dept. of Elec. Eng., Univ. of Wisconsin-Madison, 1993.
- [15] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, p. 30, 1968.

저 자 소 개



李 在 雄(正會員)

1980년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1984년 8월 서울대학교 물리학과 이학석사. 1993년 8월 포항공과대학교 전자전기공학과 공학박사. 1984년 11월 ~ 1989. 2 국방과학연구소 연구원. 1994년 4월 ~ 현재 순천대학교 전자공학과 전임강사 및 조교수. 관심분야는 X선 리소그래피, 반도체소자 모델링, 영상처리



徐 容 德(正會員)

1996년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 공학사. 1996년 3월 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정. 관심분야는 X선 리소그래피

金 五 顯(正會員)

1977년 2서울대학교 전자공학과 공학사. 1979년 8한국과학기술원 공학석사. 1983년 8한국과학기술원 공학박사. 1979년 9월 ~ 1980년 2월 삼성반도체통신주식회사 기술개발실 연구원. 1983년 9월 ~ 1986년 6월 삼성반도체통신주식회사 DRAM 공정개발팀 팀장. 1989년 2월 ~ 1990년 2월 Bell Communications Research (Post. Doc.). 1986년 9월 ~ 1990년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수. 1986년 9월 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 부교수. 관심분야는 반도체 소자 공정 및 모델링, TFT 소자 개발, X선 리소그래피, E-beam 리소그래피

崔 普 景(正會員)

1990년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사. 1992년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사. 1998년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 공학박사. 1994년 7월 ~ 1994년 9월 이태리 CNR-IESS 파견연구원. 현재 LG 반도체 중앙연구소 선임연구원. 관심분야는 E-beam 리소그래피, X선 리소그래피

金 熙 相(正會員)

1995년 2월 포항공과대학교 물리학과 이학사. 1997년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사. 현재 LG 반도체 중앙연구소 연구원. 관심분야는 X선 리소그래피 공정 개발