

감광제의 노광변수 추출을 위한 효율적인 전산모사기

김상곤, 변성환, 정연운, 조선영, 오진경, 이영미, 이은미, 성문규, 손영수, 오혜근
한양대학교 물리학과
sangkona@hotmail.com

Effective Lithography Simulator for Extraction of Photoresist Exposure Parameter

Sang-Kon Kim, Sung-Hwan Byun, Yeon-Un Jeong, Sun-Young Cho, Jin-Kyung Oh,
Young-Mi Lee, Eun-Mi Lee, Moon-Gyu Sung, Young-Soo Sohn, Hye-Keun Oh
Department of Physics, Hanyang University
Sangkona@hotmail.com

Abstract

The semiconductor technology for the deep submicron regime(0.18 μm) and larger wafer diameters(300 μm) has been increased its cost with each wafer. Hence, in order to reduce the number of characterization experiments of a new process, lithographic modeling is more important than it was. In this paper, we introduced a new method to extract Dill ABC parameters from the refractive index changes. In order to evaluate our exact method, results of experiments and calculations for several resists were compared with other methods[1] through the lithographic simulation.

I. 서론

반도체 칩의 고집적화를 위한 미세 패턴형성은 현재 248 nm 광원으로 0.2 μm 근처의 선폭까지 만들 수 있다. 향후 Giga bit 급의 소자를 만들기 위해서는 0.18 μm 이하의 Critical dimension 이 요구되고 있으며 파장이 짧은 ArF 광원 사용 및 감광제의 정확히 특성을 파악에 관한 많은 연구들이 실제적으로 대두되고 있다. 감광제는 설계된 반도체 회로를 웨이퍼에 전사시킬 때 빛의 조사 여부에 따라 달리 감응함으로써 회로 패턴을 형성할 수 있도록 하는 노광 공정용 재료이다. 감광제

는 크게 감광되는 빛의 파장에 따라 분류되며 이 중 수은방전등의 g선용과 i선용 제품은 각각 4 Mb DRAM 및 16 Mb DRAM 양산에 사용되며 DUV용 감광제는 64 MB DRAM 이상의 반도체 제조에 사용된다. 노광하는 과정에서 많은 감광제의 물리적인 성질이 변하게 된다. 감광제가 빛을 흡수하여 구조적인 변화를 일으켜 두께가 변하게 된다. 그리고 굴절계수(n)와 소광계수(k)도 변하여 노광공정 중에 감광제로 입사되는 빛의 반사량과 투과량을 바꾸게 한다.

본 논문은 직접적인 공정 실험보다 시간, 재료 및 경비를 훨씬 줄여 줄 수 있으며 근본적인 공정 불량 의 원인까지 찾아낼 수 있는 전산모사 도구(시뮬레이션)로 이러한 감광제의 성질 및 공정조건들을 살펴보았다. 즉, 노광변수를 추출하기 위하여 Dill 의 Graphic 방법[1]에 반사(Reflection)를 고려하였으며 소광계수를 이용한 추출방법을 소개하였다. 본문에서 기존의 방법 들 및 새로운 방법을 소개하고 결론에서 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다.

2. 본론

Dill 의 노광변수[2]는 입사 빛의 세기와 Photoactive compound(PAC) 농도를 나타내는 것으로

desired line width, maximum process latitude, optimum resist thickness, 그리고 exposure dose 알 수 있는 중요한 변수

이다. 광노광에 의해 resist 에 도달한 빛의 세기분포는

$$\partial I(x, z, t) / \partial z = -\alpha I(x, z, t) \quad (1)$$

$$I(z, t) = I_0 \exp \{-\int (\alpha M + B) dz\} \quad (2)$$

여기서

$\alpha = AM(x, z, t) + B$: 흡수계수, I; 빛의세기

M; PAC의 농도, z; 표면으로 부터의 resist 깊이

빛에 의한 반응으로 시간이 지남에 따라 PAC가 파괴되어 억제제의 농도 M값이 줄어드는 것에 대한 표현으로

$$\partial M(x, z, t) / \partial t = -CI(x, z, t) M(x, z, t) \quad (3)$$

$$M(z, t) = M_0 \exp\{-\int IC dt\} \quad (4)$$

여기서 t; exposure 시간,

방정식 (3)식 과 (5)식에서 Dill 의 변수 A,B,C 값들을 구할 수 있다. 이 변수를 추출하는 방법들을 소개하면 다음과 같다.

가. 다중박막간섭(Multiple Thin Film Interference)[1]

다중 박막 유전층은 단색광에 의해 노광되어질 때 박막 내에서 정상파가 생성된다. 공기 중의 웨이퍼 위에 증착된 박막 감광제에서 각 영역의 전기장은 평면 파들의 중첩이다. 각 계면에서 경계조건을 만족하는 Maxwell 방정식을 풀면 박막의 깊이 z 인 영역에서의 전기장을 구할 수 있으며 감광제 내에서 빛의 세기 $I_2(z)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_2(z) = I_0 |E_{2\text{incident}}(z)|^2 + R_{\text{total}23} |E_{2\text{reflected}}(z)|^2 \quad (5)$$

여기서

$$E_{2\text{incident}}(z) = \gamma_{12} \{ \exp(-ik_2 z) + \rho_{23} \gamma_{23}^2 \exp(ik_2 z) \} / \{ 1 + \rho_{12} \rho_{23} \gamma_{23}^2 \} \quad (6)$$

$$E_{2\text{reflected}}(z) = \tau_{32} \{ \exp(-ik_2(D_2-z)) + \rho_{23} \tau_{21}^2 \exp(ik_2(D_2-z)) \} / \{ 1 + \rho_{32} \rho_{21} \tau_{21}^2 \} \quad (7)$$

$$R_{\text{total}23} = (n_3/n_1) \tau_{\text{total}13} \tau_{\text{total}13}^* \{ \rho_{34} \rho_{34}^* / (1 - \rho_{34} \rho_{34}^* \rho_{\text{total}13} \rho_{\text{total}13}^*) \} I_0$$

; 석영/공기 경계면에서의 전체 반사도 (8)

$$\tau_{\text{total}ik} = \tau_{ij} \tau_{jk} \tau_{Dj} / (1 - \rho_{34} \rho_{34}^* \tau_{Dj}^2); \text{연속적인 } i, j, k \text{ 층에서 전체 투과계수} \quad (9)$$

$$\rho_{\text{total}ik} = \rho_{ij} + \tau_{ij} \tau_{jk} \rho_{ik} \tau_{Dj}^2 / (1 + \rho_{ij} \rho_{ik} \tau_{Dj}^2); \text{연속적인 } i, j, k \text{ 층에서 전체 반사계수} \quad (10)$$

$$\exp(-ik_2 z) = \exp\{(1/2) \int \alpha_0(z') dz'\} \exp\{i(2\pi/\lambda) \int \alpha_0 n_2(z') dz'\} \quad (11)$$

$$\rho_{ij} = (n_i - n_j) / (n_i + n_j); i, j \text{ 접촉면에서 반사계수} \quad (12)$$

$$\gamma_{ij} = 2n_i / (n_i + n_j); i, j \text{ 접촉면에서 투과계수} \quad (13)$$

$$\gamma_{Dj} = \exp(-ik_j D_j); i \text{ 층의 내부 투과도} \quad (14)$$

$$\kappa_i = 2\pi n_i / \lambda; \text{매질 } i \text{ 의 전파 상수, } D_j; i \text{ 층의 두께} \quad (15)$$

$$\lambda; \text{진공 중에서 입사광의 파장} \quad (16)$$

$$n_i = n_i - ik_i; i \text{ 층 복소 굴절계수, } \alpha = 4\pi k / \lambda; \text{흡수계수} \quad (17)$$

이다. 수은 i-line 빛에 대해 전체 막 투과도는

$$T = (n_3/n_1) \tau_{\text{total}13} \tau_{\text{total}13}^* \{ (1 - \rho_{34} \rho_{34}^*) / (1 - \rho_{\text{total}13} \rho_{\text{total}13}^* \rho_{34} \rho_{34}^*) \} \quad (18)$$

$$\tau_{D2} = \exp\{-(1/2) \int \alpha_0(z') dz'\} \exp\{-i(2\pi/\lambda) \int \alpha_0 n_2(z') dz'\} \quad (19)$$

나. DILL 그래픽 방법[1]

만약 반사가 없다면, 식(2)로부터

$$T(z, t) = I_0 \exp \{-\int (\alpha M + B) dz\} \quad (20)$$

초기시간(t=0) 일때 노광이 없는 상태이므로 M(PAC)=1 이고 완전노광시 t=∞, M=0 인 조건을 사용하여 식(20)을 계산하면,

$$A = (1/d) \ln \{T(\infty) / T(0)\} \quad (20)$$

$$B = -(1/d) \ln \{T(\infty)\} \quad (21)$$

$$C = (A + B) / AT(0)(1 - T(0)) I_0 (dT(0) / dt) \quad (22)$$

다. 반사를 고려한 DILL 그래픽 방법

접촉면에서 반사를 고려하여 식(20), 식(21), 식(22) 다시 표현하면,

$$A = (1/d) \ln \{ \{T(\infty) / (1-R(\infty))\} / \{T(0) / (1-R(0))\} \} \quad (23)$$

$$B = -(1/d) \ln \{T(\infty) / (1-R(\infty))\} \quad (24)$$

$$C = (A + B) / A \{T(0)/(1-R(0))\} \{1 - T(0)/(1-R(0))\} I_0 \{dT(0)/dt\} \quad (25)$$

라. 허수 굴절계수 방법

허수 반사계수를 이용한 ABC 노광변수의 추출은 식(17)로부터,

$$k = (\lambda/4\pi)\alpha = (\lambda/4\pi)(AM + B) = (\lambda/4\pi)\{A \exp(-CE) + B\} \quad (26)$$

초기시간(t=0), M(PAC)=1 이고 t=∞, M=0 인 조건을 사용하여 식(26)을 계산하면,

$$A = (4\pi/\lambda)\{k(0) - k(\infty)\} \quad (13)$$

$$B = (4\pi/\lambda) k(\infty) \quad (14)$$

$$C = -(1/E) \ln \{ (k(t) - k(\infty)) / (k(0) - k(\infty)) \} \quad (15)$$

여기서

$k(0)$; 노광전 resist 의 extinction 계수

$k(\infty)$; 노광후 resist의 extinction 계수

$k(t)$; t 시간에서 extinction 계수

$$E = \int_0^t I_0(z,t') dt'; \text{ effective dose} \quad (16)$$

3. 실험

실험 방법은 리소그래피 공정에 준하여 실행하였다. 감광제 도포를 위해서 실리콘 웨이퍼 대신에 극자외선 광원에서 투과율이 좋은 석영 웨이퍼 위에 g-line과 i-line resist는 MTI Flexifab 11-SB-55 모델로 193nm resist 는 spin coater (Laurell 사의 WS-200-8T2 모델) 회전 방식으로 하였다. 일반적인 다중 속도 단계를 거쳐서 감광제를 웨이퍼에 도포하게 되며, 최적의 균일성을 나타내는 속도, 시간과 감광제의 량을 먼저 찾은 다음 그 조건으로 도포하였다. 전열처리(Pre-bake)는 감광제 내부에 분포하는 용제를 증발시켜 일정한 경도를 나타내게 하는 과정으로 감광제의 PED(Post exposure delay) 효과를 막기 위해서 전 공정 시간을 단축하였다. 실시간으로 감광제에 투과되는 에너지의 량을 정확하게 측정하기 위해서 두 개의 자외선 광측정센서를 이용하였다. Joulemeter (Moletron 사의 EPM 2000 모델)를 엑시머에서 방사되는 레이저 펄스파의 에너지의 변화를 감안하여 출력되는 에너지의 값을 읽어들이는 광센서로 J4-09/J9LP/ J25LP detector 는 실제 감광제의 투과율을 측정하는 광센서로 사용하였다. {그림1}은 실험배치도 이다.

Transmittance Measurement

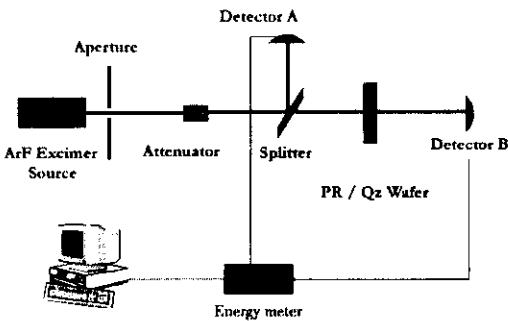


그림 1. 감광제 특성 조사의 실험 기기 배치도

측정한 데이터에서 감광제에 입사된 에너지량과 투과도를 얻어내었다. 여기서 얻은 에너지는 감광제 앞에 있는 광학적인 조명계를 지난 실제 감광제 표면에 도달한 단위 면적당 에너지이다. 투과도는 감광제 내에서 간섭을 일으킨 후의 값이고 노광량에 따라서 변한다. 감광제의 두께 측정용 노광 전후에 시행하였다. 두께의 측정은 surface profiler(Sloan Daktak3)로 하였다. 측정값의 오차 한계를 줄이려고 여러 번 측정된 다음 평균값을 취하였다.

감광제의 굴절계수와 소광계수를 측정하기 위해서 투명한 석영 웨이퍼 위에 감광제를 얇게 도포하였으므로 ellipsometer로의 반사광이 웨이퍼 밑 측정장치 바닥에서 반사된 빛에 의해서도 영향을 미칠 것으로 판단하여, 새로운 굴절률 계산 방법을 시도하였다. 여기에서 사용한 방법은 측정된 투과도와 다중 박막 계산을 한 결과를 비교하는 것이다. 실험을 통해서 얻은 투과도는 각 접촉면으로부터 다중 반사의 결과적인 투과도이다. 그래서 굴절률을 포함하는 다중 박막 간섭 식을 최소자승(least-square) 시켜서 계산된 투과도 값을 구했고 실험 투과도와 비교하여 잘 일치하는 그 값의 굴절률을 구했다.

4. COMPUTER SIMULATION

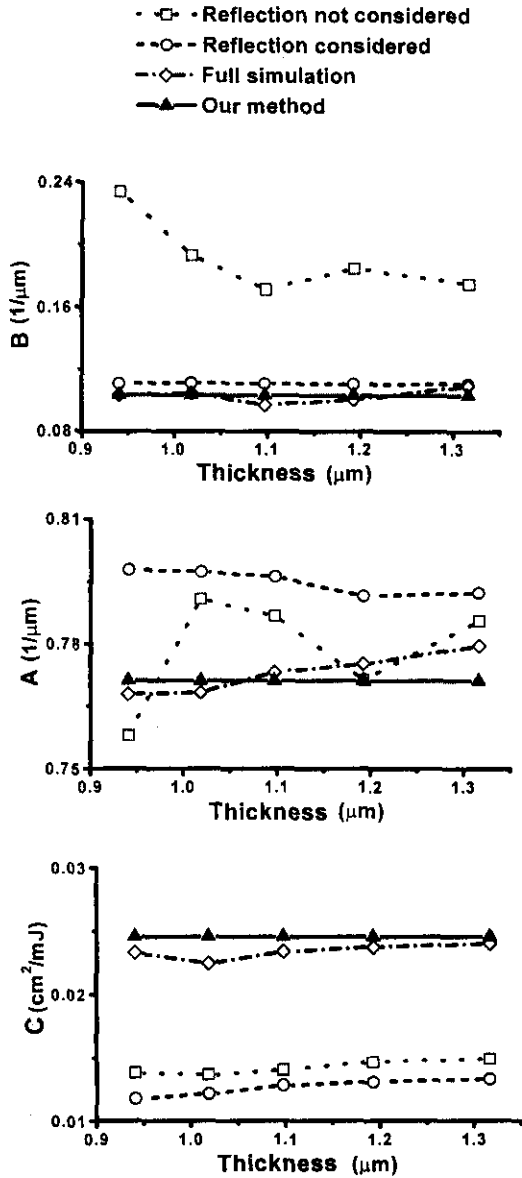
Table.1 각 방법에 따른 노광변수

PR	Method	A(1/μm)	B(1/μm)	C(cm2/mJ)
g-line	Dill그래픽	0.622±0.013	0.0669±0.0109	0.0190±0.0006
	다중박막	0.618±0.006	0.0044±0.0025	0.0346±0.0026
	반사 Dill	0.640±0.002	0.0046±0.0000	0.0168±0.0008
	허수굴절	0.617±0.009	0.0053±0.0058	0.0320±0.0012
i-line	Dill그래픽	0.779±0.014	0.1917±0.0251	0.0143±0.0006
	다중박막	0.773±0.005	0.1030±0.0046	0.0234±0.0006
	반사 Dill	0.795±0.003	0.795±0.003	0.0126±0.0007
	허수굴절	0.765±0.015	0.1056±0.0116	0.0235±0.0012

Table.1은 각각의 방법들로 구한 Dill 의 노광변수를 비교하였다. A 변수는 모든 방법에 대하여 같고, 구한 B의 변수에서 Dill 그래픽은 다른 방법들과 차이를 갖으며, C의 변수에서 다중박막 계산방법과 허수굴

적방법이 다른 방법으로 구한 C값에 두배 큰 결과를 얻었다. 그림2는 i-line 에 적용하여 구한 A,B,C 값을 두께변화에 대한 그래프이다.

그림.2 두께변화에 따른 i-line 노광변수



5. 결론

Dill 의 변수는 A는 노광에 의존하는 흡수상수 (μm^{-1})이며 B는 노광과 무관한 흡수상수(μm^{-1}), C는 resist 의 감광도(cm^2/mJ)를 나타내는 상수이다. 실험결과 허수 굴절계수를 이용한 방법으로 구한 결과는 다중박막으로 구한 결과와 동일하여 g-line과 i-line에서 잘 적용됨을 보여주었다.

참고문헌

[1] Clifford L. Heanderson, Sanju N. Pancholi, Sajed A. Chowdhury, C. Grant Wilson, "Photoresist Characterization for Lithography Simulation Part2 : Exposure Parameter Measurements", SPIE, Vol. 3049, 816-828, 1997

[2] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge : IEEE Trans. Electron Devices ED-22 (1975) 445.