

# 전자기파 산란을 이용한 Submicron 광학 MASK의 특성 및 최적화\*

최준규 · 박정보 · 김유석 · 이성득

서울대학교 물리교육과

(1997년 3월 17일 받음)

최신(4GDRAM)의 MASK design에서는 전자기파의 산란에 의한 효과를 고려해주는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 시간 영역에서의 유한 차분법을 도입하여 직접 마스크 함수를 계산하였다. 새롭게 도입한 마스크 함수를 사용함으로써 마스크와 렌즈의 효과뿐만 아니라 submicron 노광용 위상 변이 마스크의 식각된 옆벽에서의 산란효과를 정확하게 설명할 수 있었다. 산란효과를 줄이기위해 변형된 마스크의 형태에 따른 특성을 살펴보고, dual wet etch back에 의한 마스크 변형이 가장 좋은 공정 여유도를 제공함을 확인하였다.

## I. 서 론

광리소그래피에서 구현하려는 패턴은 Rayleigh의 회절관계에 가까워질수록 시뮬레이션으로 예상했던 것과는 상당히 다른 실험결과들이 나타난다. 특히 위상 변이 마스크의 경우는 식각된 옆벽에서 산란 효과 때문에 기존의 결상식으로 설명이 불가능한 경우가 발생하게 되었다.<sup>[1]</sup> 이러한 현상들을 시뮬레이션으로 정확히 예측하려는 노력들은 다양하게 시도되어져 왔다.<sup>[2-7]</sup>

본 논문에서는 시간 영역에서의 유한 차분법을 도입하여, 기존의 결상 계산식의 마스크 함수를 수정함으로써 마스크와 렌즈에서 벡터효과 뿐만 아니라 위상 변이 마스크의 식각된 옆벽에서의 산란 효과까지 설명할 수 있게 되었다. 수정된 결상식을 적용함으로써 산란효과를 줄이기 위한 여러 위상 변이 마스크의 형태에 따른 특성을 파악하였고, 최적의 etch back depth 구간을 결정할 수 있도록 하였다.

## II. 전자기파의 산란에 대한 수치 해석적 접근

시간 영역에서의 유한차분 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 출발하여 격자를 나누어 식을 세운후 경계조건을 고려해주는 순서를 따른다.

간단한 예로  $\epsilon, \mu$ 를 시간에 불변하는 상수,  $J=0$ 으로 두고  $z$ 축에 무관한 TM 방향으로 편광된 전자기파에 대해 문제를 단순화 시키면,  $H_z=0, E_x=E_y=0$ 이므로 맥스웰 방정식은 아래와 같이 간단히 정리된다.

$$\begin{aligned} \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \\ \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} &= -\frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 [그림 1]의 YEE가 제안한 방법을 따라 시간 영역

\*본 연구는 한국전자통신연구소의 차세대반도체 기반기술 개발 사업에 의하여 연구되었습니다.

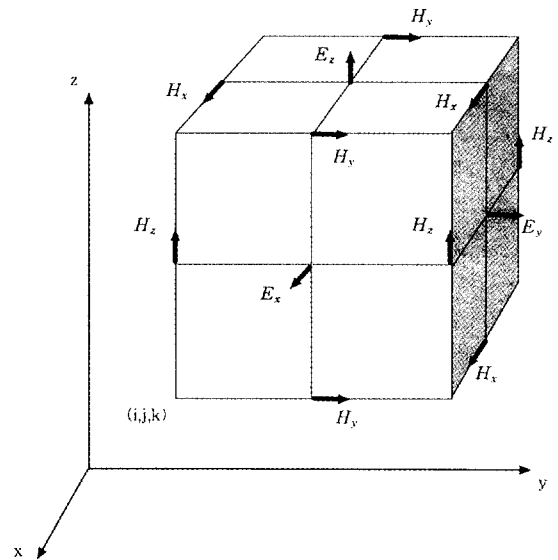


그림 1. 단위 격자에서 전기장과 자기장의 위치

에서의 유한 차분 방정식으로 고칠 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i, j) &= E_z^n(i, j) \\ &+ Z \frac{\Delta \tau}{\Delta x} \left[ H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j) \right] \\ &- Z \frac{\Delta \tau}{\Delta x} \left[ H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j) \right] \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) &= H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - \frac{1}{Z} \frac{\Delta \tau}{\Delta y} [E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)] \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} H_x^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) &= H_x^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - \frac{1}{Z} \frac{\Delta \tau}{\Delta x} [E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)] \end{aligned} \quad (2c)$$

$$\Delta\tau = c \Delta t = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}} \Delta t, \quad Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \text{ 이다.}$$

시간 영역에서 유한 차분 방정식을 써서 수치해석적으로 전자기과의 산란에 대한 문제를 풀 때, 실제 전자기과는 계속 진행하지만 계산하는 영역은 유한하기 때문에 반드시 경계 조건을 고려해 주어야 한다.<sup>[11]</sup>

왼쪽으로 진행하는 파에 대하여 경계면(x=0)에서의 경계조건을 일차, 이차근사를 써서 미분 방정식을 풀면 각각 아래와 같다.

$$E_z^{n+1}(0, j) = E_z^n(1, j) + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \{E_z^{n+1}(1, j) - E_z^n(0, j)\} \quad (3a)$$

$$E_z^{n+1}(0, j) = E_z^n(1, j) + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \{E_z^{n+1}(1, j) - E_z^n(0, j)\} - \frac{\mu c}{2(c\Delta t + \Delta x)} \left\{ H_x^{n+\frac{1}{2}}(0, j + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(0, j + \frac{1}{2}) + H_x^{n+\frac{1}{2}}(0, j + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(0, j + \frac{1}{2}) \right\} \quad (3b)$$

### III. 결상식의 수정

부분 간섭 조명을 사용하였을 때 상면에서 빛의 세기를 구하기 위한 홉킨스 식은 공간 주파수 영역에서 아래의 식을 역푸리에 변환을 함으로써 얻을 수 있다.

$$I(f, g) = \iint F(f, g) F^*(f + f', g + g') TCC(f, g; f', g') df' dg' \quad (4)$$

TCC(Transmission Cross Coefficient)함수는 조명계와 투사 렌즈의 NA등에 의해 결정되고, F는 마스크 함수로 푸리에 변환을 통해서 간단히 구해진다.

$$F(f, g) = \iint_{-\infty}^{\infty} M(x, y) e^{2\pi i(fx + gy)} dx dy$$

$$M(x, y) = te^{i\phi} \quad (\text{t는 투과율, } \phi \text{는 위상을 나타낸다.}) \quad (5)$$

$$TCC(f, g; f', g') = \iint J_0(f'', g'') K(f + f'', g + g'') K^*(f + f', g + g' + g'') df'' dg'' \quad (6)$$

$J_0$ 는 조명 광원추(illumination cone)이고  $K, K^*$ 는 동함수(pupil function)이다.

$$J_0(f, g) = \begin{cases} \text{constant} = \frac{1}{\pi\sigma^2} \left( \frac{\lambda}{NA} \right)^2, & f^2 + g^2 < \sigma^2 \left( \frac{NA}{\lambda} \right)^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$K(f, g) = \begin{cases} e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} \Phi(f, g)}, & f^2 + g^2 \leq \left( \frac{NA}{\lambda} \right)^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

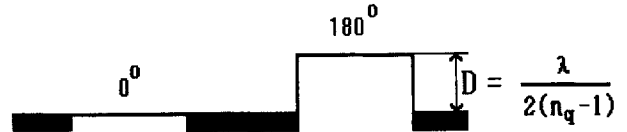


그림 2. 위상변이 마스크

$\Phi(f, g)$ 는 파면수차(wavefront aberration)에 관한 부분으로써, 일반적으로  $(l, m, n)$ 의 값에 따라 여러 가지 수차를 고려할 수 있도록 아래 식처럼 주어진다.

$$\Phi(f, g) = \sum_{l, m, n} C_{lmn} (x^2 + y^2)^l (xf + yg)^m (f^2 + g^2)^n \quad (9)$$

[그림 2]와 같은 위상변이 마스크의 경우 홉킨스 식을 이용하여 상면에서 빛의 세기를 구하면, 뚫린 부분은 서로 반파장의 위상차를 가지고 빛이 통과하므로 분해능이 두배로 증가될 것으로 예상되어진다.

구현하려는 패턴의 크기가 파장에 비해서 충분히 클 경우 시뮬레이션으로 예측한 결과는 실험결과와 거의 동일하게 나타나지만, 회절무늬에 의해 제한되는 분해한계로 다가갈수록 실제 실험결과<sup>[12]</sup>는 시뮬레이션에 의한 예상과 상당히 다른 차이를 나타낸다. 즉, [그림 3a], [그림 3b]에서와 같이 위상이 180°인 부분은 0°인 부분에 비해서 훨씬 적은 선폭을 보여주고 있다.

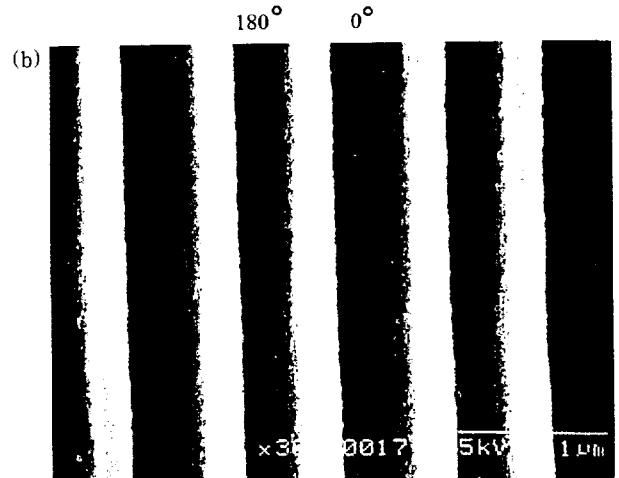
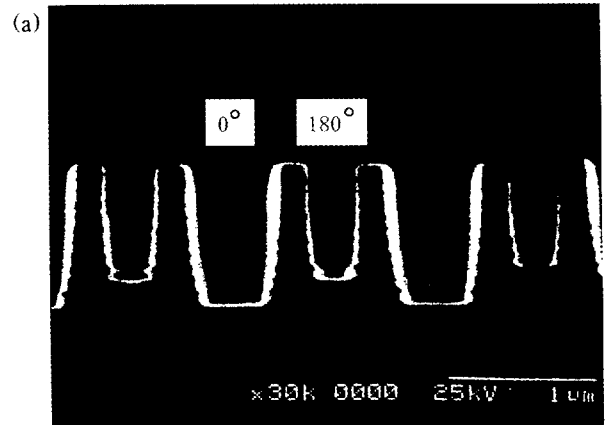


그림 3. (a) 실험결과와 SEM 사진(단면도) (b) 실험결과와 SEM 사진(평면도)

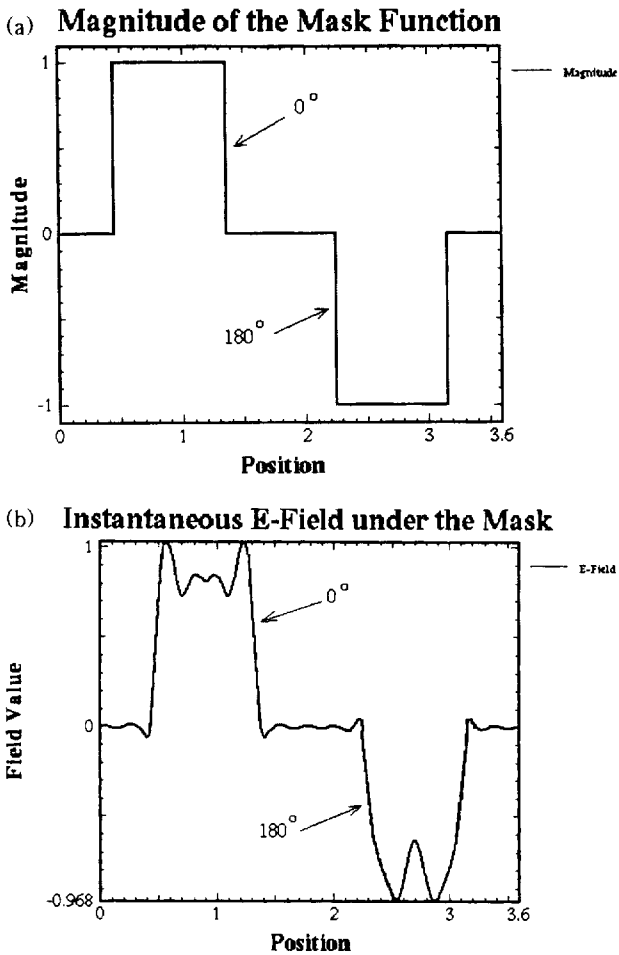


그림 4. (a) 기존의 결상 계산식에 의한 마스크함수  
(b) 유한 차분 방정식에 의한 마스크함수

시뮬레이션에 의한 예측과 실제 실험결과가 상당한 차이를 보이는 이유는 마스크를 통과한 직후의 빛의 세기를 다음과 같은 방법에 의하여 비교해봄으로써 알 수 있다.

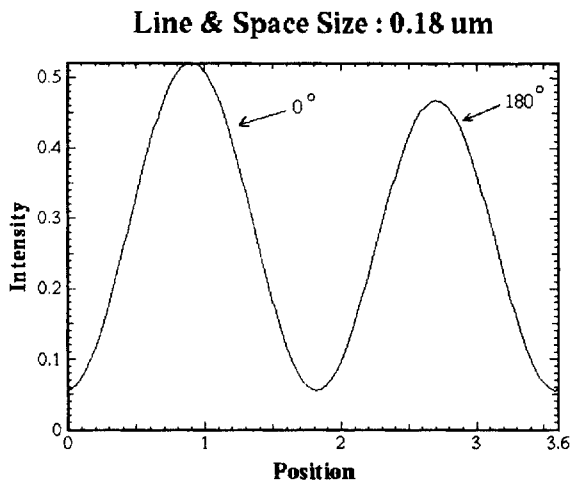


그림 5. 상면에서의 빛의 세기  
( $\lambda=248 \mu\text{m}$ ,  $\sigma=0.5$ ,  $\text{NA}=0.5$ , 배율=5:1 system)

기존의 결상 계산식에 의한 이론적인 마스크 함수 [그림 4a]와 유한 차분법을 이용하여 계산한 마스크 함수 [그림 4b]를 비교하면 위상이 180°인 부분이 0°에 비해서 상당히 차이가 남을 확인할 수 있다. 따라서 [그림 2]와 같은 위상 변이 마스크의 경우 상면에서의 빛의 세기를 실제에 가깝게 계산하기 위해서는 홉킨스 이론에 쓰인 기존의 마스크함수 대신 유한 차분 방정식에 의한 마스크 함수를 사용하는 것이 타당하다. 즉, 식 (5)에서 쓰인 마스크함수로 홉킨스 이론에 따른 [그림 4a]를 푸리에 변환하는 것이 아니라 [그림 4b]에 해당하는 유한 차분 방정식으로 계산되어진 마스크 함수를 푸리에 변환한 것을 대입하여 계산한다.

이렇게 수정된 결상식으로 계산하였을 때 상면에서의 빛의 세기를 살펴보면 아래 [그림 5]와 같은 빛의 세기를 얻어 [그림 3]의 실험결과와 일치함을 확인할 수 있다.

#### IV. 위상 변이 마스크의 형태에 따른 특성

막힌 곳과 뚫린 곳이 일정하게 반복되는 위상 변이 마스크는 뚫린 곳의 위상을 180°차이가 나도록 함으로써 전통적인 마스크에 비해 구현하는 선폭을 두배로 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 앞서 본 바와 같이 이론적으로 위상차가 180°가 되도록 마스크를 정확하게 설계, 제작하더라도 식각된 부분의 옆벽에서 일어나는 전자기파의 산란효과 때문에, 앞에서 밝힌 바와같이 상면에서 빛의 세기를 살펴보면 선폭이 일정하지 않음을 볼 수 있었다. 이런 이유로 기존의 위상 변이 마스크의 형태를 변형하여 산란효과를 줄이려는 노력들이 다양하게 시도되고 있다.<sup>[13]</sup> 일반적으로 많이 이용되는 방법들에 대하여 정리하면 [그림 6]과 같다.

[그림 6]에 나타난 각각의 변형된 위상 변이 마스크들의 형태에 따른 특성들을 서로 비교함으로써 어떤 방법이 산란에 의한

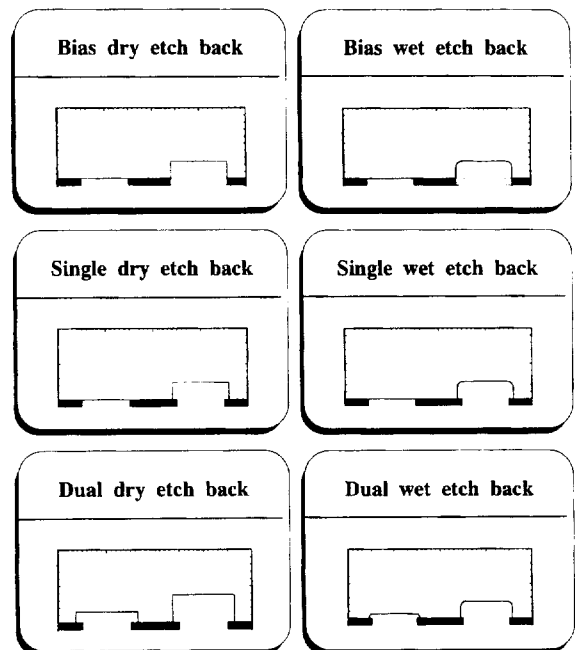


그림 6. 산란효과를 줄이기위해 변형된 마스크 형태

효과를 가장 잘 보정할 수 있는지 살펴보았다. 시뮬레이션에 적용된 스테퍼 변수를, 광원은 KrF Excimer Laser로 0.248  $\mu\text{m}$ , 투사 렌즈의 NA는 0.55, 간섭도 0.5인 5배율의 시스템으로 고정시켰다. 구현하려는 선폭은 크기가 1GDRAM 급에 필요한 0.18  $\mu\text{m}$ 에 대해서 etch back depth와 bias를 어느정도 주어야 위상이 0°와 180°를 통과한 빛의 세기가 거의 같아지는지를 예측해보도록 하였다. 모든 경우에 대하여 초점면에서만 살펴보았고, 편광 방향은 편의상 TE-polarization으로 통일하였다.

#### 4.1. Bias etch back의 경우에 대한 연구

[그림 7c]와 [그림 7d]는 각각 [그림 7a]와 [그림 7b]의 오른쪽을 확대해서 나타낸 것이다. 각각은 40 nm~60 nm 정도의 bias etch back을 통해서 위상이 0°인 부분과 180°인 부분의 빛의 세기가 비슷해지는 것을 확인할 수 있다. Bias etch back은 dry etch와 wet etch에 의한 차이는 거의 없으며, bias를 주는 길이가 변함에 따라서 빛의 세기 변화가 심하다는 것이 관측된다. 즉, 80 nm 이상의 etch back depth에서는 오히려 위상이 180°인 부분의 빛의 세기가 위상이 0°인 부분보다 높아지는 현상이 발생한다. 따라서 탈초점에서는 위상이 0°인 부분과 180°인 부분의 빛의 세기 차이는 더욱 심하게 변할것

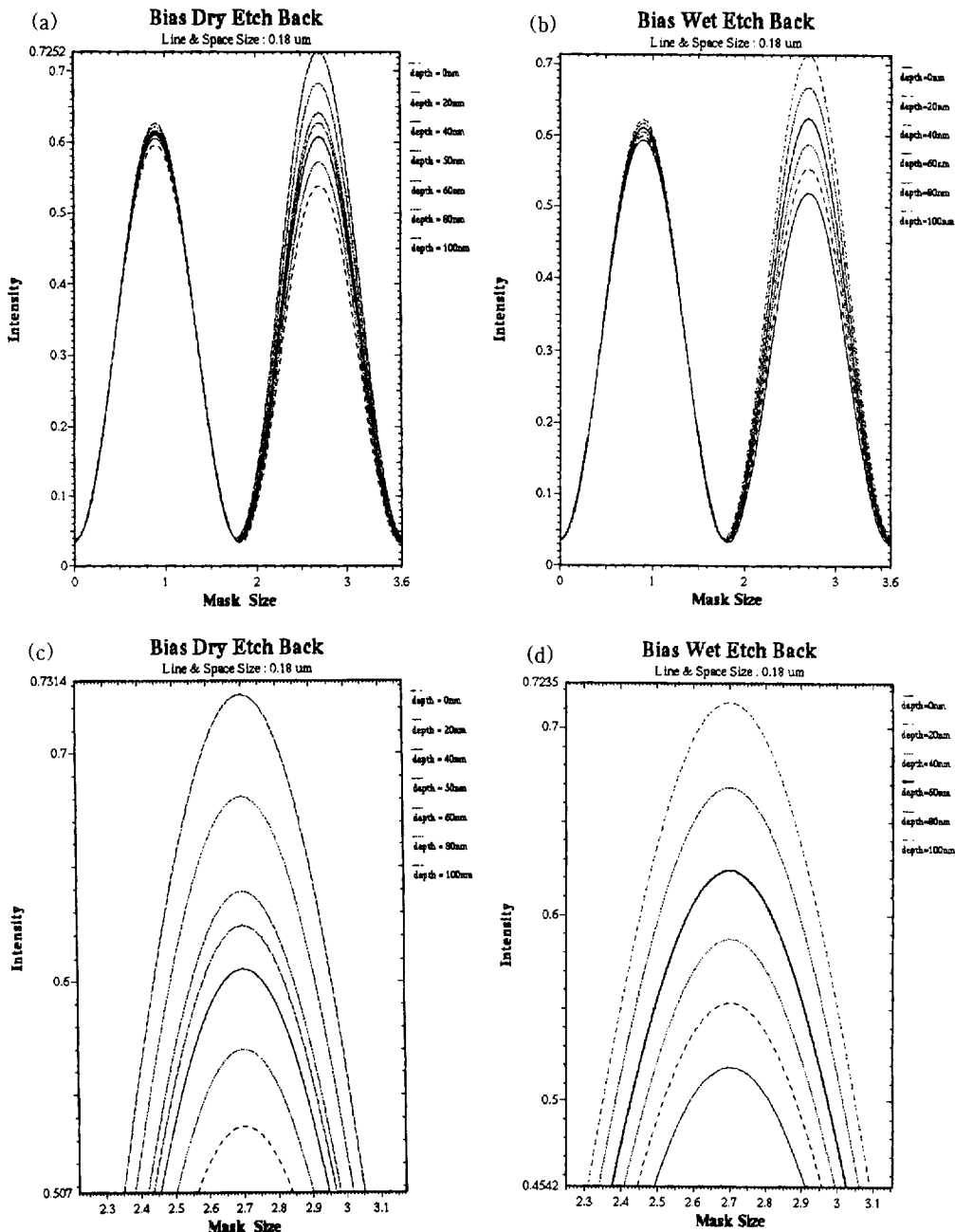


그림 7. (a) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Dry etch), (b) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Wet etch), (c), (d) 각각은 (a), (b)의 오른쪽 부분을 확대한 것이다.

으로 예상되기 때문에 bias etch back을 통한 scattering off의 보정은 좋은 방법이 아니다.

**4.2. Single etch back의 경우에 대한 연구**

[그림 8c]와 [그림 8d]는 각각 [그림 8a]와 [그림 8b]의 오른쪽 쪽을 확대해서 나타낸 것이다. 각각은 65 nm~50 nm 정도에서 bias etch back을 통해서 위상이 0°인 부분과 180°인 부분의 빛의 세기가 비슷해지는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 dry etch와 wet etch에 의한 차이가 거의 없으며 bias etch back에서와는 달리 넓은 영역의 etch back depth(100 nm)에서

도 빛의 세기 변화가 그리 심하지 않다. 뿐만아니라 150 nm 정도까지 etch back depth를 변화시켜도 빛의 세기가 역전되지 않고 어느정도 안정된 경향성을 보인다.

**4.3. Dual etch back의 경우에 대한 연구**

[그림 9c]와 [그림 9d]는 각각 [그림 9a]와 [그림 9b]의 오른쪽 쪽을 확대해서 나타낸 것이다. Single etch back에서와 마찬가지로 etch back depth를 증가시킬수록 빛의 세기가 비슷해지나 dual etch back에서는 wet etch의 경우 dry etch와 달리 거의 200 nm까지 etch back depth를 변화시켜도 양쪽의 빛의 세

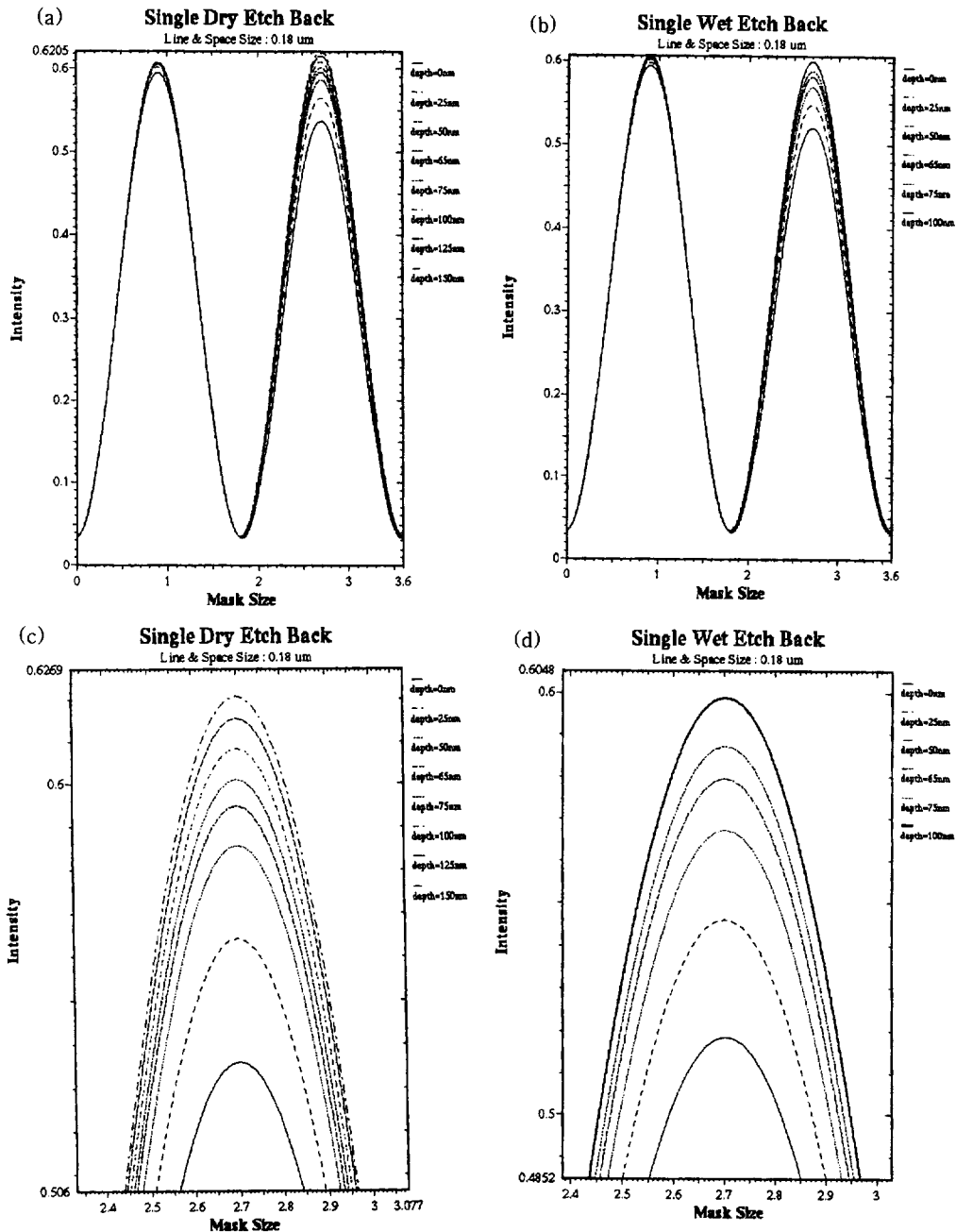


그림 8. (a) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Dry etch), (b) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Wet etch), (c), (d) 각각은 (a), (b)의 오른쪽 부분을 확대한 것이다.

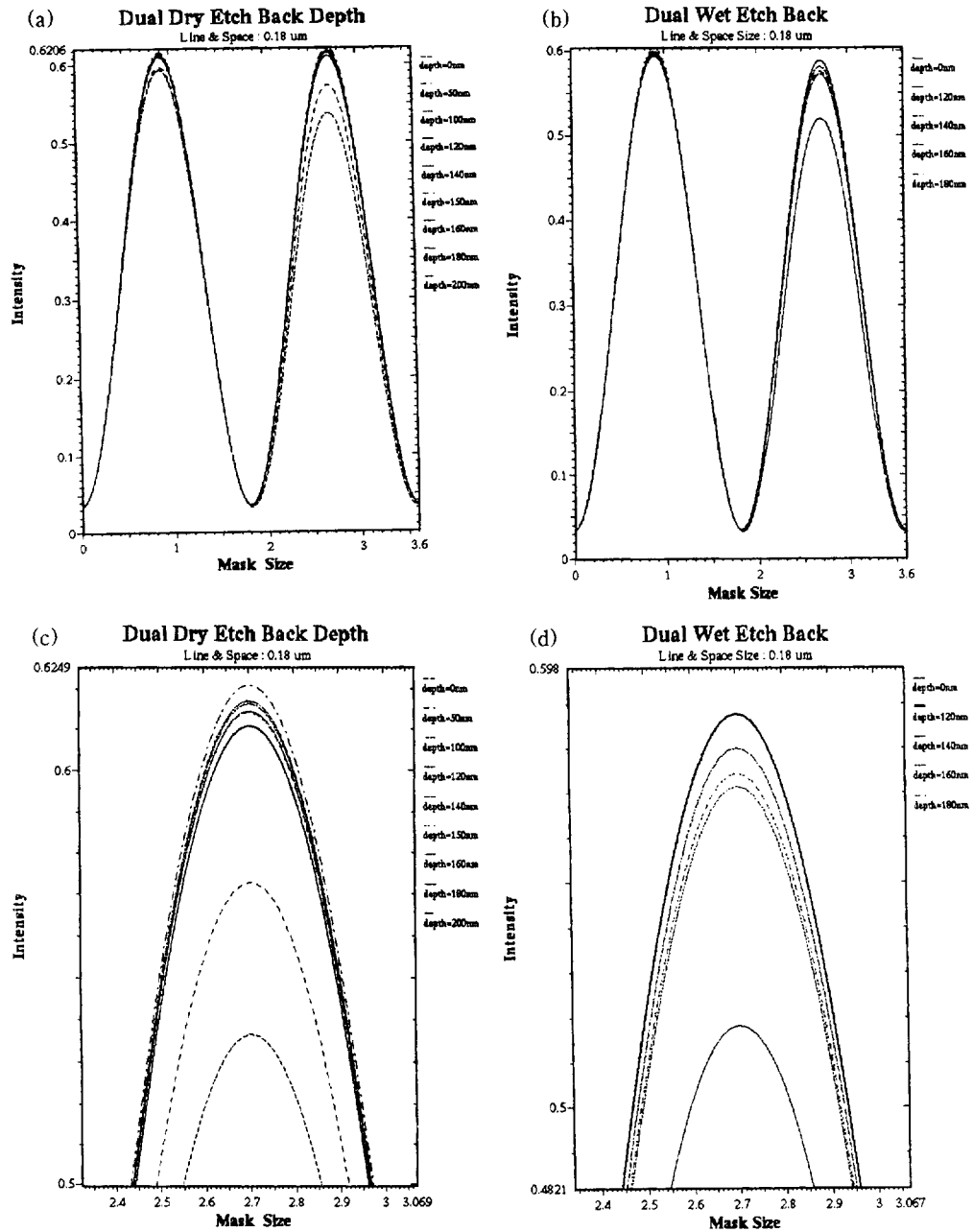


그림 9. (a) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Dry etch), (b) Etch back depth에 따른 상면에서 빛의 세기 변화(Wet etch), (c), (d) 각각은 (a), (b)의 오른쪽 부분을 확대한 것이다.

기가 역전되는 현상이 전혀 나타나지 않는다. 그러나 일반적으로는 dry etch나 wet etch에서 위상이 0°인 부분과 180°인 부분의 빛의 세기가 역전되는 현상은 거의 나타나지 않고 할 수 있겠다. 또한 etch back depth가 100 nm~200 nm 사이에서 큰 변화 없이 빛의 세기가 비슷한 것을 확인할 수 있다. 따라서 dual etch back의 경우는 etch back depth의 변화에 대해서 Bias etch back, Single etch back과 비교해서 빛의 세기의 변화가 가장 안정되어 있고 가장 좋은 공정 여유도를 제공한다고 할 수 있겠다.

V. 요약 및 결론

위상 변이 마스크는 전통적인 마스크에 비해 이론적으로 구현할 수 있는 선폭이 두배로 늘어나는 장점이 있기 때문에 변형 조명법 등을 함께 이용하여 광리소그래피에서 구현할 수 있는 선폭을 낮추어 왔다. 그러나 기존의 계산 방법으로는 위상 변이 마스크에 대해 상면에서 빛의 세기를 시뮬레이션을 통해 예측했을 때, 실제의 실험 결과에서 나타난 위상이 180°인 부분이 식각된 옆벽에서의 산란 효과 때문에 위상이 0°인 부분에 비해서 구현되는 선폭이 굉장히 좁아지는 현상을 설명할 수가 없다. 이것을 극복하기 위한 방안으로 시간 영역에서의 유한 차분 방정식을 도입하였다. 유한 차분 방정식을 써서 수치 해석적으로 구해진 마스크를 통과한 직후의 빛의

세기로부터 새로운 마스크 함수를 구하였고, 새롭게 구해진 마스크 함수를 흡킨스 식에 다시 적용함으로써 실험 결과와 같은 예측이 가능하였다.

1GDRAM에 필요한 0.18  $\mu\text{m}$ 의 선폭을 잘 구현할 수 있도록 전통적인 위상 변이 마스크를 변형시킨 6가지 패턴에 대해서 수정된 결상식을 적용하여 상면에서 빛의 세기를 살펴 보았다. 각각의 형태에 따른 특성들을 초점면에서 시뮬레이션 하여 얼마만큼의 etch back depth를 주어야지 위상차가 0°인 곳과 180°인 곳의 밝기 세기가 비슷해져서 패턴이 잘 구현되는 지를 살펴 보았다. bias를 주는 경우는 가장 쉽게 마스크를 변형시켜 산란에 의한 효과를 보정할 수 있지만 bias depth가 조금씩 변화됨에 따라서 빛의 세기가 심하게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 탈초점에서 상변형이 굉장히 클 것으로 예상되기 때문에 그다지 좋은 방법이 아니라고 생각된다. Single etch back의 경우는 etch back depth를 증가시키면 위상차가 0°인 곳과 180°인 곳의 밝기 세기가 점차적으로 비슷해지며, 이것은 bias를 주는 경우에 비해서 좋은 결과를 보여 준다. 그러나 dual etch back에 비해서는 etch back depth의 공정여유도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. Single etch back은 위상이 180°로 뚫린 한쪽 부분만 마스크를 변형시켜서 산란에 의한 효과를 보정하는 반면에 dual etch back은 0°와 180°로 뚫린 양쪽 부분을 모두 변형시키기 때문에 simulation에서 차이를 보였다. Giga급 DRAM의 제작에서 산란에 의한 효과를 보정하는 방법으로 dual etch back을 이용하여 위상 변이 마스크를 제작하는 것이 가장 효과적이라는 결론을 내릴 수 있겠다.

### 참 고 문 헌

- [1] R. L. Kostelak, C. Pierrat, J. G. Garofalo and S. Vaidya, *Exposure characteristics of alternate aperture phase-shifting masks fabricated using a subtractive process*, J. Vac. Sci. Technol., B 10(6), pp. 3055-3061, Nov/Dec (1992).
- [2] Alfred K. Wong and Andrew R. Neureuther, *Polarization Effects in Mask Transmission*, Proc. SPIE vol. 1674, pp. 193-200 (1992)
- [3] Kevin D. Lucas, Andrzej J. Strojwas, K. K. Low and Chi-Min Yuan, *Intensity Optimization for Phase Shifting Masks*, Proc. SPIE vol. 1927, pp. 438-449 (1993).
- [4] Chi-Min Yuan, *Calculation of One-Dimensional Lithographic Aerial Images Using the Vector Theory*, IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-40, pp. 1604-1613, Sep. (1993).
- [5] Christophe Pierrat, Alfred Wong, Sheila Vaidya and Matthew Vernon, *Phase-Shifting Mask Topography Effects on Lithographic Image Quality*, Proc. SPIE vol. 1927, pp. 28-41 (1993).
- [6] Alfred K. Wong and Andrew R. Neureuther, *Mask Topography Effects in Projection Printing of Phase-Shifting Masks*, IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-41, pp. 895-902, June (1994).
- [7] Tsuneo Terasawa, Norio Hsegawa, Akira Imai and Shinji Okazaki, *Analysis of Nonplanar Topography Effects of Phase Shift Masks on Imaging Characteristics*, Jpn. J. Appl. Phys. vol. 34 pp. 6578-6583 Part 1, No. 12B, Dec. (1995).
- [8] Karl S. Kunz and Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, Inc., (1993).
- [9] Allen Taflove, *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, Boston London, (1995).
- [10] Kane S. Yee, *Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media*, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-14, pp. 302-308, May (1966).
- [11] Gerrit Mur, *Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations*, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. EMC-23, pp. 377-382, Nov. (1981).
- [12] R. L. Kostelak, C. Pierrat, J. G. Garofalo and S. Vaidya, *Exposure characteristics of alternate aperture phase-shifting masks fabricated using a subtractive process*, J. Vac. Sci. Technol., B 10(6), pp. 3055-3061, Nov/Dec (1992).
- [13] R. Ferguson, R. Martino, R. Budd, G. Hughes, J. Skinner, J. Staples, C. Ausschnitt and J. Weed, *Etched-quartz fabrication issues for a 0.25  $\mu\text{m}$  phase-shifted dynamic random access memory application*, J. Vac. Sci. Technol., B 11(6), pp. 2645-2650, Nov/Dec (1993).

**The characteristics and optimization of submicron optical mask using electromagnetic scattering effect**

Jungue Choi, Jungbo Park, Yuseok Kim and Sungmuk Lee  
*Dept. of Phys. Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received : March 17, 1997)

Recently, in designing optical mask such as 4GDRAM, the scattering effect of electromagnetic wave must be considered. For this reason we calculated directly the mask function using the finite difference time domain(FDTD) method. The modification of image theory with this new mask function could explain clearly the scattering effect at the etched side wall of the submicron optical mask. The characteristics of the various type of alternating PSM were investigated. According to the simulation, the dual wet etch process was the most useful fabrication technique to overcome the light scattering off at the shifted opening.