

微細光리소그라피를 위한 位相變位 技術의 原理

(Principles of Phase Shifting Micro-photolithography)

李相洙

한국과학기술원 물리학과

(1991년 12월 23일 받음)

오늘날 16 M-DRAM 나아가서 64M-DRAM 제작을 위한 미세광리소그라피에서 위상변조된 마스크를 이용하여 높은 解像度를 얻고자 하는 연구가 세계적으로 추진되고 있다. 이 방법의 원리를 소개하고자 한다.

I. 序 論

Micro-lithography 方法에는 여러가지가 있다. 光波를 이용하는 photolithography, 電子線이나 ion-beam을 이용하는 方法, X-ray를 이용하는 方法 등 여러가지가 있고, 한가지 方法안에서도 技法에 따라서 몇가지 다른 方法이 있다. 이들 方法들은 다 長短點을 지니고 있기 때문에 오직 전문가들의 細密한 配慮가 함께 하므로서 소기의 高密度 리소그라피의 目的을 達成 할 수 있다. 예를 들어서 micro-photolithography를 생각하여 보면, 우선 光源으로서 水銀燈의 g-line(436 nm)나 i-line(365 nm)를 쓸수 있고, photo-resist로서, 크게 나누어서 positive resist와 negative resist가 되고, 그들의 서로다른 特性曲線이 있고, wet-process가 흔히 이용되나 短波長 excimer레이저 光波를 써서 dry-etching 시키는 方法도 있고, 또 stepper 光學系로서는 렌즈系와 反射鏡界가 있고 또 catadioptric系도 있다. Mask를 照明하는 光源로서 incoherent illumination系(水銀燈)이 있는가 하면, 레이저光波(excimer(XeCl; 309 nm, KrF; 248 nm ArF; 193 nm), YAG-laser 光波의 第3次調和波等)을 이용할 수도 있다.

이들 가운데서 產業的으로 適切한 것은 오늘날 널리 이용되고 있는 photolithography이다. 4 M-DRAM 까지는 收率이 비교적 좋게 리소그라피가 되나, 16 M-DRAM부터 收率이 低下해서, 實驗室에서 64 M-DRAM에 成功했다 또는 256 M-DRAM 더욱 나아가서 1G-DRAM에 成功했다고 報告가 나와 있으나, 產業的으로 實用하는 데는 아직 작지 않은 問題가 가로놓여 있다.

이러한 狀況에서突破口를 찾는데 다음과 같은 接近方法에 따라서 位相變位技術(phase-shifting technology)

i) 發展하게 되었다. 즉

ㄱ) 在來의 光리소그라피 기술 위에 선다.

ㄴ) 水銀燈의 i-line(365 nm)를 쓴다.

ㄷ) 光學系 stepper를 쓴다. Hg등의 g-line에서 i-line으로 넘어갈 때, 光學系의 色收差에 대한 檢討가 必要함.

ㄹ) Mask에 位相變造를 加한다.

지금까지의 mask는 振幅物體이다. 이 mask에다 位相變造(phase modulation)을 加해서 位相變造한 振幅物體(phase modulated amplifude object)로 해서 分解能을 올리고자 하는 것이다.

이러한 생각은 波動光學에서 pattern recognition^[1]에서 흔히 쓰여 왔고, photolithography에서는 M. D. Levenson^[2,3]등에 의해서 1980년대 초에 제안 되었다. 그의 연구결과는 약 3년전 까지 크게 關心을 끌지 않았으나, 오늘에 와서 16 M-DRAM 이상의 高密度半導體 칩의 量產目的과 더불어 主로 日本과 獨逸에서 개발의 대상이 되었다.

II. 光學 分解能에 관한 Rayleigh Criterion와 Maréchal Criteria

Rayleigh는 像面(이 논문에서 초평면)에 생기는 Airy disk(收差가 없는 理想的인 光學系)에서 최초로 光波의 振幅이 零이 되는 點에서

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot z}{f} = \pi$$

(f' ; 초점거리, d ; 口徑의 반지름, 口徑은 4角形^[4])가 成立하고, 이때의 $R = z = \frac{\lambda}{2} \times \frac{f'}{d}$ 를 分解能 R 로 정하였다.

媒質의 屈折率을 n' 로 잡고, λ 를 真空波長으로 잡으

면 $n' \frac{d}{f'} = n' \sin \theta = \text{numerical aperture(NA)}$ 인

고로 $R = \frac{k\lambda}{NA}$, $k=0.5$, (단, circular aperture; $k=0.61$)
(1)

이 된다.

Photolithography에서 쓰이는 mask는 凹凸形이 있기 때문에 defocussing(δz)문제가 생간다.^[5] 이 defocussing aberration을 考察할 때, Marechal의 criteria^[4]에서

$$\frac{1}{2} n' \sin \theta^2 \cdot \delta z = \pm \frac{\lambda}{4}, \quad \lambda: \text{真空波長}$$

$$\text{즉, } n' \cdot \delta z = \frac{l\lambda}{(\text{NA})^2}, \quad l = \pm 0.5,$$

$$\text{공기중에서 } \delta z = \frac{l\lambda}{(\text{NA})^2}, \quad n' = 1 \quad (2)$$

을 얻는다. δz 는 depth of focus에서 DOF라고 쓰기도 한다. (1)式의 R 와 (2)式의 DOF가 photolithography에서 흔히 인용 되는 두가지 parameter로서, 光學系 또는 micro-photolithography의 精密度를 말할 때 기준이 되고 있다.

III. 物體(mask)에 대한 位相變造 -位相變位-의 原理

1次元 物體를 $A(x)$ 로 表現하면 第2焦平面위의 空間周波數(spatial spectrum)은^[4]

$$\int_{x_p}^{x_q} a(x) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx \quad (3)$$

로서 주어진다. $A(x)$ 위 $x=p' \sim q'$ 사이에, 투명한 誘電體薄膜($\rho \exp(i\phi)$)을 입혔다면 위 積分은 아래에 따로 쓴 (4)식과 같이 되고 렌즈의 口徑이 無限大일 때 $S(\omega)$ 의 inverse Fourier transform의 像振幅 $a(x')$, (倍率; -1)를 준다. (4) 式에서

$$\begin{aligned} \int_{x_p}^{x_q} a(x) \exp(-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx &= \int_{x_p}^{x_q} a(x) \exp(i\omega x) dx = U(\omega) \\ \int_{x_p'}^{x_q'} a(x) \exp(-\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx &= \int_{x_p'}^{x_q'} a(x) \exp(i\omega x) dx = V(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

로 놓으면,

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} U(\omega) e^{-i\omega x'} d\omega = u(x'), \quad (6)$$

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} V(\omega) e^{-i\omega x'} d\omega = v(x')$$

로서 像面振幅 $a_{-1}(x')$ 은 完全하게 $a(x')$ 와 같지 않으며,

$$a_{-1}(x') = u(x') + \{\rho \exp(i\phi) - 1\}v(x') \quad (7)$$

이 고, 強度分布는

$$|a_{-1}(x')|^2 = I(x')$$

$$= |U(x') + \{\rho \exp(i\phi) - 1\}V(x')|^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \int_{x_p'}^{x_q'} a(x) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx + U(\xi) \int_{x_p'}^{x_q'} a(x) \rho \exp(i\phi) \cdot \rho \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx + \int_{x_q'}^{x_q} a(x) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx \\ &= \int_{x_p}^{x_q} a(x) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx + (\rho e^{i\phi} - 1) \times \int_{x_p'}^{x_q'} a(x) \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x\xi}{f'}) dx \\ &= S(\omega), \quad \text{但, } \omega = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\xi}{f'} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 렌즈의 口徑이 無限大이면, $a_{-1}(x') = a(x')$ 이다.

(4) 式은 띠구경(annular aperture)^[6]으로 일어지는 像點의 回折振幅(또는 強度)의 表現과 꼭 같다. 띠구경을 써서 Rayleigh criterion을 凌駕하는 分解能을 얻을수 있다는 點은 알려진바 오래고, 특히 렌즈나 거울의 口徑위에서 振幅과 位相을 變調시켜서 렌즈의 收差와 分解能을 向上 시키고자 하는 apodization^[7] 技術도 研究된지 오래다.

비록 表現은 같으나, 位相變位技術(phase shifting technology)는 口徑變調(aperture modulation)가 아니고, mask 또는 reticle에 對한 位相變調(物體變洞, object modification)^[8]이다. 現在 흔히 쓰이는 ϕ 값은 $\pi (= k \frac{\lambda}{2})$ 이다.

따라서 (7)式은

$$a_{-1}(x') = u(x') + (-\rho - 1)v(x') \quad (9)$$

가 된다.

4. 位相變位技術을 應用하는 例

그림 1에 $x_q = b$, $x_p = -b$ ($= 5 \mu\text{m}$)이 있고, $x_p \sim x_q$ 가 $-b \sim -b + \varepsilon$ 과 $b - \varepsilon \sim b$ ($\varepsilon < 1 \mu\text{m}$)인 mask가 그려 있고, 렌즈 L에 의해서 O'面에 像이 이루어 지고 있다. 空間周波數

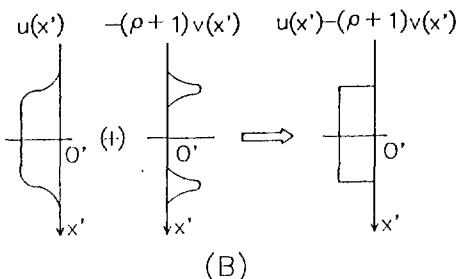
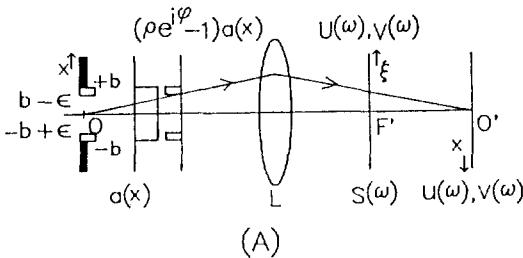


Fig. 1. Phase Shifting Technology의 원리($b = 5 \mu\text{m}$, $\varepsilon = 1 \mu\text{m}$, $\varphi = \pi$)

$U(\omega)$ 面의 焦點 F' 위에 서 있다. (5)式의 $U(\omega)$, $V(\omega)$ 는

$$\begin{aligned} U(\omega) &= \int_{-b-\varepsilon}^{-b} e^{i\omega x} dx = 2b \frac{\sin \omega b}{\omega b} \\ V(\omega) &= \int_{-b-\varepsilon}^{-b+\varepsilon} + \int_{b-\varepsilon}^b = 2\varepsilon \cos \left\{ \omega \left(b - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right\} \\ &\times \frac{\sin(\omega \varepsilon / 2)}{\omega \varepsilon / 2} \end{aligned} \quad (10)$$

로 表現되고, 각 스펙트럼은

$$\omega b = \frac{\pi}{2}(2N+1), N \geq -\frac{1}{2} \text{ 인 양정수}$$

$$\omega \varepsilon / 2 = \frac{\pi}{2}(2N+1), N \geq -\frac{1}{2} \text{ 인 양정수}$$

$$\text{但, } \omega = \frac{2\pi \xi}{\lambda f'} \quad (11)$$

을 充足하는 점에 생긴다. 이 때의 ω 와 ξ 의 값은 다음과 같다.

$$U(\omega); \omega_N = \frac{\pi}{2b} (2N+1), \xi_N = \frac{\lambda f'}{4b} (2N+1)$$

$$V(\omega); \omega_N = \frac{\pi}{2\varepsilon} (2N+1), \xi_N = \frac{2\lambda f'}{4\varepsilon} (2N+1) \quad (12)$$

但, $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

이들 ξ_N ($N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)에 있는 空間 spectra에서 나가는 單振動光波가 重疊해서 $a_{-1}(x')$ 를 이루고, 렌즈의 口徑이 ∞ 면 Fourier transform되어서 $a(x')$ 즉 물체(mask)와 꼭 같은 像이 생긴다. 現實의으로 렌즈의 口徑이 有限하니 (7)式의 $a_{-1}(x')$ 를 얻을 수 밖에 없다. 즉 物體의 正確한 step-function 振幅의 끝이 문그려 진다 (round-off). 그림 1의 像面위의 振幅分布($u(x')$ 와 $(\rho e^{j\varphi} - 1)v(x')$)가 그려 있다. (2)式에서 보는 바와 같이 일부 스펙트럼이 상형성에 참여하지 못해서 $V(\omega)$ 는

$$10\text{倍} \left(\frac{4b}{2\varepsilon} \right) = \frac{4 \times 5 \mu\text{m}}{2 \times 1 \mu\text{m}} = 10, \text{ 그림 1 참조} \text{나 더 분산}$$

되어 있으니 $v(x')$ 는 더욱 끝이 뭉그려져 있다.

$u(x')$ 와 $v(x')$ 는 서로 符号가 反對아니, 핵친 振幅의 모양은 좀더 鋒利한 끝을 지니게 된다.

M. Levenson은 phase shifting technology를 써서 分解能을 $0.2 \mu\text{m}$ 까지 높일 수 있다고 主張하고, 日本에서는

0.17 μm 까지 成功하였다 한다. 16 MDRAM의 수율을 올리고, 64 M DRAM 또는 256 M DRAM의 超高密度半導體칩을 生産하는데 有益한 接近方法을 이 phase shifting technology가 제공 하고 있다.

5. 結 論

最近研究開發되고 있는 phase shifting micro-photolithography는 現在 흔히 쓰이고 있는 光學系 stepper를 그대로 쓰되 分解能을 向上시키고자 하는 接近方法으로서,^[8] Abbe의 回折結像理論에 근거를 두고 있다. 이 理論은 物體를 格子의 集合으로 看做하고 있으며, Fourier光學의 基盤도 Abbe 이론에 있다. 오늘날 까지 흔히 Rayleigh criterion을 들어서 分解能으로 삼고 stepper 光學系나 photolithography가 연구 되어 왔으나, Abbe 理論에서 부터 다시 검토해 보겠다는 뜻으로 볼 수 있다.

이러한 시각에서 부터, 오늘날의 mask를 位相變調시켜 써야 한다는 것이다. 이때 mask製作이 더욱 어려워지고, 어떠한 位相變調를 시켜야 할 것인지 振幅 mask의 Fourier 解析이 先行되어야 한다.

그러나 產業的技術의 發展은 앞선 技術을 바탕으로해서 最大로 發展시켜 나가는 慎重性과 健實性을 지니고 있어야 한다. 輕率하게 새로운 것만 追從해서는 않될 것으로 생각한다. 이런 點에서 볼때 phase shifting technology가 매우 所重하게 여겨지고, 波動光學 그 中에서도 Fourier optics, pattern recognition optics 등을 專攻하는 專門家들의 關心이 한층더 提高 되기를 바란다.

오늘날의 振幅 mask를 써서 photolithography를 施行하는 stepper는 人端히 高價이다. 또 分解能을 올리기 위해서 마음대로 照明系의 光波長을 바꿀 수도 없다. Stepper 光學系의 色收差 때문이다. 쓰고 있는 stepper를 그냥쓰고, phase shifting technology를 開發해서 分解能을 提高시키고자 하는 努力이 健全하게 둘 보인다.

끝으로 한가지 추가해야 할 것이 있다. 앞에서 말한바 mask의 Fourier analysis에 관련하여 phase shifter에 言及코자 한다. Phase shifter는 半導體 chip에 올린 pattern에 추가 해서 補助回折光波를 發生시키는 役割을 한다. 따라서 위의 Fourier analysis를 수행 할 때, phase shifter의 pattern을 mask pattern과 함께 物體로 看做해야 한다. 어떠한 모양의 phase shifter를 어디에 놓고, 位相變調를 얼마나 시킬 것인가 하는 質問에 대한 答은 오로지 組織的인 조사 결과의 蕩積에서 얻어질 것이다.

또한 位相變調 $\rho e^{i\phi}$ 의 ρ 와 ϕ 에 여러가지 값을 주고, 결과를 비교해 보아야 할 것이다. ϕ 가 반드시 π 라야 한다는 조건은 없다. 讀者가 phase shifting technology의 原理를 이해하는 데 도움이 되기를 바란다.

감사의 글

이 論文을 쓰는데, 한국과학기술 연구원의 曹在喆 博士와 나눈 토론이 유익하였다. 感謝의 뜻을 전하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] ·白應基, 韓國科學技術院 博士學位論文, 1980.
- 曹在喆, 韓國科學技術院 博士學位論文, 1983.
- 李仁遠, 韓國科學技術院 博士學位論文, 1975.
- [2] M. D. Levenson et al., IEEE Trans. Electron Devices, ED-29, 1828 (1982).
- [3] M. D. Levenson, et al., IEEE Trans. Electron Devices, ED-31, 753 (1984).
- [4] 今相洙, 波動光學, 數學研究社, 1983.
- [5] 今相洙, 幾向光學, 數學研究社, 1985.
- [6] 洪京熹, 韓國科學技術院 博士學位論文, 1980.
- [7] 鄭昌慶, 英國 Reading 大學校, 博士學位論文, 1984.
- [8] 岡崎信次, 應用物理(日本應用物理學會社), 1976, Vol. 60, No. 11 (1991).