

0.1 μm 급 dense 패턴 형성을 위한 사입사 조명 조건과 OPC 보조 패턴 크기의 최적 조건에 관한 연구

박정보 · 이재봉 · 이성목[†]

서울대학교 물리교육과

④ 서울시 관악구 신림동 산56-1번지

(2000년 12월 27일 받음, 2001년 5월 11일 수정본 받음)

본 연구에서는 193 nm의 ArF excimer laser 광원과 0.65의 NA를 갖는 광학계에서, 기본 선폭이 0.10 μm 이고 duty ratio가 1:1인 dense line & space(LS) 패턴에 대하여 여러 사입사 조명 조건에 따른 초점심도(Depth of Focus; DOF)와 cutoff intensity를 확인하고, 기본 capacitor 패턴에서 광학적 근접 효과 보정을 위한 hammer head형 보조 패턴의 크기와 여러 사입사 조건에 따른 DOF와 cutoff intensity의 변화에 대하여 알아보았다. 그 결과, 0.1 μm 급의 dense 패턴 구현을 위해서는 전형적인 X자형 시구 조명보다는 십자(+)형 시구 조명이나 환형 조명이 보다 효과적인 것을 알 수 있었다. 이와 더불어, 보조 패턴의 크기가 약간 변한다 하더라도 일정한 초점심도와 cutoff intensity를 유지하는 경향을 보이는 특정한 조명 조건이 존재함을 밝히고 그에 따라 최적의 조명 조건과 보조 패턴의 크기에 대하여 알아보았다.

분류코드 : SM.010.

I. 도 입

최근의 반도체 소자 제작에서 지속적으로 요구되어지는 패턴 선폭의 축소는 기존의 광학적 리소그래피(Optical Lithography) 방법에 상당한 부담이 되고 있다. 이미 광학적 분해능의 한계를 넘은 극소 패턴의 구현을 위해서, 여러 가지 형태의 분해능 향상 기술(Resolution Enhancement Technique; RET)들이 많은 리소그래피 관련 연구자들에 의해 연구되어 왔고 또한 계속 연구중이다. 이러한 RET 방법들 중 대표적인 예로는 사입사 조명(Off-Axis Illumination; OAI),^[1,2] 위상 변이 마스크(Phase Shift Mask; PSM),^[3] 광학적 근접효과 보정(Optical Proximity Correction; OPC)^[4-6] 등이 있다.

일반적으로 구현하고자 하는 패턴의 CD(Critical Dimension)를 얻기 위해서는 그에 따른 분해능에 대한 확보가 필요한데, 리소그래피 광학계의 정보와 분해능의 관계는 다음과 같이 간단한 Rayleigh의 분해능 공식을 따른다.

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

여기서, R은 분해능, λ 는 광원의 파장, NA는 광학계의 구경수(Numerical Aperture)를 나타내고, k_1 은 여러 공정 변수에 의해 결정되는 공정 상수를 의미한다. 만약 광학계의 부분 간섭성 조명을 고려하고, 이때 조명계의 간섭도(coherence factor)가 σ 라고 하면, 위의 분해능 관련 식은 다음과 같이 변형된다.

$$K = k_1 \frac{\lambda}{NA(1+\sigma)} \quad (2)$$

앞서 언급한 여러 가지 RET 방법들은 위 식에 주어진 공정 상수에 해당하는 k_1 값을 최대한 낮추어 광학계의 정보에 따른 분해능을 향상시키기 위한 것들이다. 기존의 연구 결과^[7]에 따르면, 기본 광학적 리소그래피에서 ~0.60의 값을 갖는 공정 상수 k_1 이 OPC를 적용한 경우에는 ~0.45, OAI를 적용한 경우에는 ~0.43, PSM을 적용한 경우에는 ~0.35 등으로 줄어들게 된다. 이 값들은 광원의 간섭도(σ)를 고려하면 다소 더 작아질 수 있을 것이다.

실제의 반도체 소자 제작에 있어서, 패턴 구현에 필요한 분해능을 확보하는 것만으로 모든 문제가 해결되는 것은 아니다. 반도체 소자의 제작을 위해서는 여러 층의 layer들을 쌓아야 하기 때문에 동일한 layer 상의 패턴이라 할지라도 하부 layer의 구조에 따라 단차가 발생하게 된다. 따라서, 단차에 의해 탈초점이 발생하더라도 균일한 패턴의 CD를 얻기 위해서는 충분한 초점심도(Depth of Focus; DOF)의 확보가 요구된다. 앞서의 Rayleigh criterion에 따른 DOF와 광학계 정보 사이의 관계는 다음과 같다.

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (3)$$

구현하고자 하는 패턴의 선폭이 점차 줄어드는 현실의 상황에서, 필요한 분해능을 확보를 위해서는 광학계의 NA가 점차 커질 수밖에 없다. 그러나, 위의 식 (3)에서 알 수 있듯이 DOF는 광학계 NA의 제곱에 반비례하기 때문에 NA가 커질 수록 구현 가능한 DOF는 줄어들게 된다. 그러므로, 목표로 하는 패턴의 CD를 구현하기 위해서는, 분해능의 확보뿐만 아니라, DOF의 확보도 항상 함께 고려해야 한다.

본 연구에서는 193 nm의 ArF excimer laser 광원과 0.65의 NA를 갖는 광학계에서, 기본 선폭이 0.10 μm 이고 duty ratio

[†]E-mail: sungmuk@snu.ac.kr

가 1:1인 line&space(LS) 패턴에 대하여 여러 OAI 조건에 따른 DOF를 확인하고, 기본 capacitor 패턴에서 hammer head형 OPC 보조(sub-resolution) 패턴의 크기와 여러 OAI 조건에 따른 DOF의 변화에 대하여 알아보고자 하였다. 또한, 각 상황에서 cutoff intensity를 구해봄으로써, 필요한 과다 노광(over exposure)^[9] 어느 정도인지를 확인하였다. 모든 결과는, 기본적으로 광학적 반응도 좋고 contrast도 큰 감광제(Photo Resist; PR)를 가정하여, 컴퓨터를 이용한 결상 계산을 통해 나타나는 aerial image 값으로 계산하였다.

조명 조건으로 사용한 OAI 방법으로는 환형(Annular) 조명과 4구(Quadrupole) 조명을 이용하였고, 4구 조명의 경우 전형적인 X자형($\phi = 45^\circ$ 형)과 십자(+)-형($\phi = 0^\circ$ 형)의 두 형태를 적용하였다. DOF의 계산에는, 허용 가능한 CD 오차에 대한 노광량(Exposure Dose)과 탈초점(Defocus)간의 상관관계를 보여주는 E-D(Exposure Dose - Defocus) tree^[8]를 이용하였다.

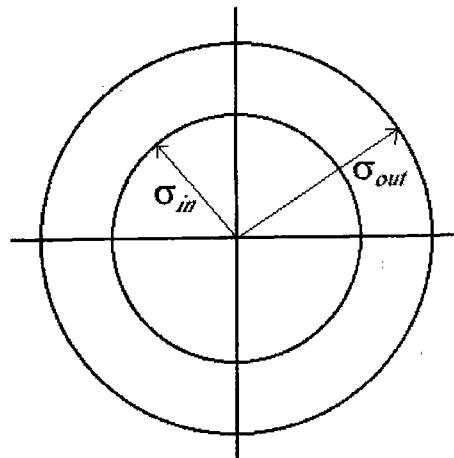
II. Simulation 조건

본 연구에서는 193 nm의 ArF excimer laser 광원과 0.65의 NA를 갖는 광학계를 대상으로 삼았고, 분해능 향상을 위해 결상 계산에 적용한 RET 방법은 OAI와 OPC이다.

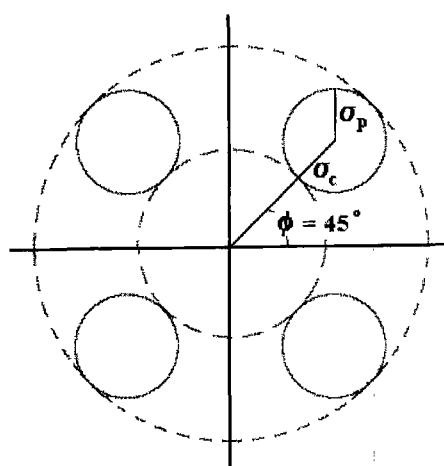
OAI 방법은 특별히 mask layout을 바꾸지 않고도 분해능과 초점심도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 전통적으로 많이 사용되어온 OAI 방법에는 환형 조명과 사구 조명(그림 1 참조)이 있는데, 사구 조명은 사구의 위치에 따라 X자형(45° 위치, 그림 1(b))과 십자형(0° 위치)이 있고, 특정 목적에 따라서는 사구의 각 위치를 이동시킬 수도 있다.^[2]

만약 일반적인 광학적 리소그래피 방법을 사용한다고 가정하면($k_1 \sim 0.60$) 식 (2)에 의해 0.1 μm의 패턴 분해능을 얻기 위해서 필요한 광원의 간섭도는 대략 ~0.80이다. 이에 따라, 환형 조명은 σ_{out} 을 0.80에서 0.95까지 0.05씩 증가시키고, $\delta\sigma$ (= $\sigma_{out} - \sigma_{in}$)를 0.2에서 0.4까지 0.1씩 증가시켜 결상 계산을 수행하였다. 사구 조명의 경우에는 환형 조명의 σ_{out} 과 $\delta\sigma$ 에 맞게, $\sigma_c + \sigma_p = \sigma_{out}$, $\sigma_p = (\sigma_{out} - \sigma_{in})/2 = d\sigma/2$ 를 만족하는 각 사구의 중심 위치(σ_c)와 크기(σ_p)를 정하였다.

일반적으로, 광학적 분해능의 한계보다 큰 패턴을 구현할 경우에는 OAI 방법만으로도 일반 조명 방법에 비해 크게 향상된 분해능과 DOF를 얻을 수 있다. 그러나, 광학적 분해능의 한계를 벗어난 크기의 패턴에서는, DRAM 등에서 쓰이는 기본 패턴 형태라 하더라도, OAI 만으로는 요구되는 분해능과 DOF를 얻기 어렵다. 특히 LS 패턴과 같이 단순한 경우가 아니라, capacitor 패턴과 같이 x방향과 y방향의 pitch가 다른 경우에는 보조 패턴을 주 패턴에 추가해주는 OPC 방법을 적용해야만 최소한의 분해능이 확보될 수 있다. 기본적인 보조 패턴으로는 bias, jog, scattering bar, serif, hammer head 등^[9-11]이 있을 수 있는데, 이번 연구의 대상이 된 capacitor 패턴의 경우에서는 bias나 serif 혹은 hammer head를 많이 적용한다. Bias 방법은 원래의 패턴자체의 크기를 키우거나 줄여서 결상면에서 요구되는 패턴의 CD를 얻는 것으로 mask layout은 간단하지만 극미소 패턴의 경우에서는 분해능의 확보가 어렵다.



(a) 환형(annular) 조명



(b) 사구(quadrupole) 조명, X자형

그림 1. OAI 조명의 형태.

Serif 방법은 분해능의 확보 측면에서는 가장 유리하지만 mask layout이 복잡해지며 특히 mask 자체의 제작에 있어서 어려움을 겪을 수 있다. 따라서, bias보다는 분해능 확보에 있어 장점을 가지면서 serif의 경우보다 mask layout이 단순한 hammer head 형태를 연구의 대상으로 하였다. 보조 패턴으로 추가되는 hammer head의 모양은 그림 2와 같다. 또한, 이번 연구에 적용된 마스크 형태는 모두 위상 변이를 고려하지 않은 단순한 binary 형태이다.

본 연구에서는, 앞서의 여러 OAI 조건에 대하여, hammer head의 크기를 변형시켜며 DOF 등을 구하였다. 그림 2에서 나타나 있는 것과 같이, 주 패턴의 크기에서 +x 방향으로 늘어나는 것은 “x+”, -x 방향으로 늘어나는 것은 “x-”, y 방향으로 늘어나는 것은 “y+”로 정의하였고, 각각이 0 nm에서 20 nm까지 10 nm씩 늘어나는 경우를 계산에 적용하였다. 여기서, 크기는 상면에서의 크기를 기준으로 한 것으로, 실제의 마스크 상에서의 패턴 크기는 광학계의 축소 배율에 따라 커지게 된다.

본 연구과정에서 계산된 모든 DOF는 E-D(Exposure Dose-Defocus) tree(그림 3참조)를 통해 구하였다.

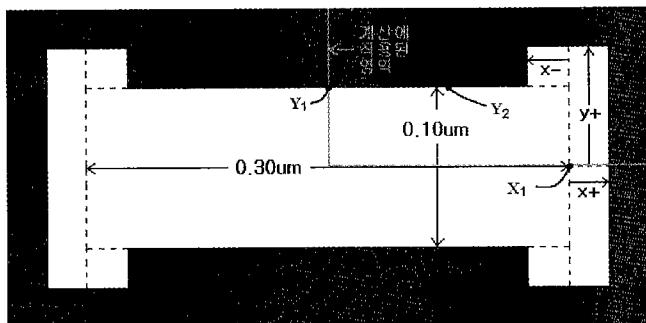


그림 2. Hammer Head 형 보조 패턴의 형태.

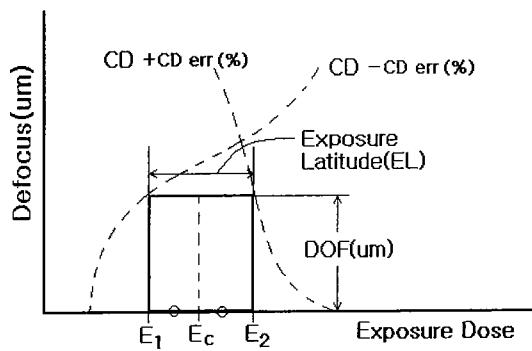


그림 3. E-D tree의 구성.

계산하고자 하는 마스크 패턴에 대하여 탈초점의 정도를 변환시켜가며 결상 계산을 수행하고, 그 결과로 얻은 intensity profile에서 CD 허용 오차에 따른 각 위치에서의 intensity 값으로부터 노광량을 구하면, 그림 3에서 보이는 바와 같이, 탈초점과 노광량에 따른 그래프를 얻을 수 있다. 이때, 노광량(Exposure Dose)은 결상 계산 결과로 구해지는 intensity 값과 역수 관계에 있다. 그림 3에서, 점선으로 나타낸 곡선이 포함하는 영역 안에서 공정이 진행되면, 허용한 CD 오차에서 패턴이 구현될 수 있음을 의미한다. 따라서, 두 점선으로 나타낸 곡선이 포함하는 영역 안에서 적절한 사각형의 창(process window)을 만들면, 주어진 광학계의 정보와 마스크 패턴의 형태에 따른 DOF와 노광 여유도(Exposure Latitude; EL)를 구할 수 있다.

이번 논문에서는, 연구의 대상이 된 광원의 파장이 짧고 광학계의 NA가 큰 편이므로, DOF의 확보에 연구의 초점을 맞추어, 주어진 EL에 대하여 최대로 얻을 수 있는 DOF를 찾도록 하였다. 이때, 계산에 적용된 CD 허용 오차로는 일반적으로 많이 설정하는 $\pm 10\%$ 로 정하였고, duty ratio 1:1의 LS 패턴에 대한 EL은 20%(노광 오차 $\pm 10\%$), hammer head 형 보조 패턴을 포함한 capacitor 패턴에서의 EL은 10%(노광 오차 $\pm 5\%$)로 하였다. Capacitor 패턴의 경우, CD 오차를 측정할 위치에 대해서 그림 2의 점 “X1”, “Y1”, “Y2”와 같이 나타내었는데, 최대한 CD line과 일치하는 상을 얻을 수 있도록 “Y2”的 위치는 “Y1”에서 주 패턴의 x 방향 끝까지의 중간으로 설정하였다.

만약에 광학계가 수차를 포함하고 있다면, +방향의 탈초점

과 -방향의 탈초점에 따른 결상 결과가 다르게 되므로, process window를 결정할 때 +방향과 -방향의 탈초점 모두에 대하여 계산을 수행해야 한다. 그러나, 본 연구에서는 광학계에 수차가 없는 것으로 가정하여 +방향의 탈초점일 때만 계산을 수행하였고, 이로부터 계산된 DOF를 두 배함으로써 실제의 DOF를 결정하였다. 그런데, DOF가 아무리 크다하더라도 너무 큰 노광량을 요구한다면 이 또한 적절한 결과로 보기 어렵기 때문에, 구해진 process window의 양 끝(E_1 , E_2)의 중심값(E_c)으로부터 다시 intensity(cut-off intensity)를 구해 어느 정도의 과다 노광(over exposure) 등이 필요한지를 확인할 수 있도록 하였다.

III. Simulation 결과 및 분석

우선 duty ratio가 1:1인 0.10 μm 의 dense LS 패턴에서, OAI 조명조건에 따른 DOF와 cutoff intensity의 결과는 그림 4에 나타나있는 바와 같다.

결과(그림 4)에서 알 수 있듯이, X자형 사구 조명에 의한 DOF는 모두 0이다. 이것은, 0.10 μm 보다 큰 패턴에 대하여, 본 연구에서 적용한 simulation tool을 이용해 연구된 선형 연구 결과^[2]나 외국의 연구 결과^[14]에서 어느 정도 효과적인 것으로 보여지는 X자형 사구 조명이, 0.1 μm 급 패턴 크기에서는 전혀 DOF를 구현하지 못한다는 사실을 나타낸다. 이와 더불어, 공간 주파수 좌표에서 사구 조명의 영향을 살펴볼 때, 높은 주파수 영역을 보다 많이 포함하는 십자형의 사구 조명이 그렇지 못한 X자형 사구 조명에 비해서 pitch가 작은 dense 패턴에서 분해능이 좋다는 기존의 연구 결과들^[12, 13]과 비교하여, 이번 연구의 결과를 통해, DOF의 측면에서도 그러한 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

환형 조명의 경우에는 전체적으로 동일한 $d\sigma$ 에서는 σ_{out} 이 클수록, 동일한 σ_{out} 에서는 $d\sigma$ 가 작을수록 DOF가 커지는 경향이 균일한 형태로 나타나고 있다. 그러나, σ_{out} 이 0.95와 같이 아주 커지면 DOF의 값이 오히려 낮아지는 것을 알 수 있는데, 이것은 Fourier 변환된 공간주파수 영역에서 볼 때, σ_{out} 이 커지면서 사입사되어 들어오는 정도가 커짐에 따라, cutoff frequency 영역에서 오히려 벗어나기 시작하는 것으로 이해할 수 있다. 따라서, 적절한 조명 조건을 선택하는 것이 무엇보다 중요한데, 가장 큰 DOF를 갖는 조건은 $\sigma_{out}/\sigma_{in} = 0.90/0.70$ 일 때이다. 그러나, cutoff intensity는 DOF의 최적 조건과 약간 달리 $\sigma_{out}/\sigma_{in} = 0.95/0.75$ 일 때(0.292)로 나타났다.

십자형 사구 조명의 경우에는 cutoff intensity가 전체적으로 균일하게 0.298 근처에서 형성되는 것을 볼 수 있고, $\sigma_{out} (= \sigma_c + \sigma_p)$ 이 0.95일 때를 제외하면 DOF의 경향성도 환형 조명의 경우와 같다. 그러나, 최적의 DOF를 보이는 조건은 환형조명의 경우와는 달리 $\sigma_c/\sigma_p = 0.75/0.10$ 일 때이다.

전체적으로 DOF의 값이나, cutoff intensity의 값을 살펴볼 때 다른 조명 조건에 비해, 십자형 사구 조명이 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 그러나, 기존의 연구 결과^[12, 13]들에서도 알 수 있듯이, 십자형 사구 조명의 경우는 MTF(Modulation Transfer Function)가 좋지 않기 때문에, pitch가 커지면 그에

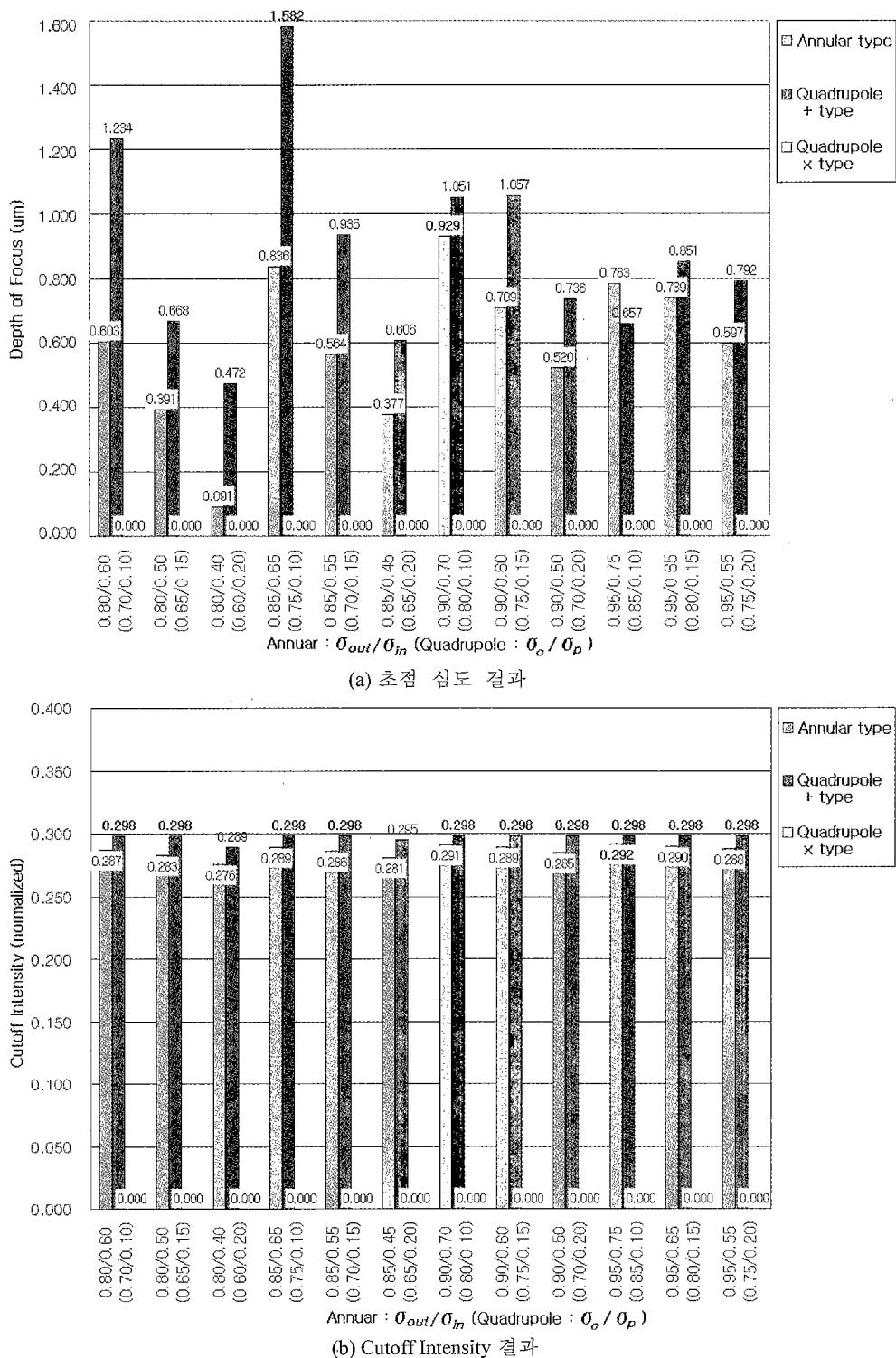


그림 4. 조명 조건에 따른 LS 패턴(1:1 dense, 0.10 μm)의 초점심도와 cutoff intensity.

따른 MTF의 효율이 급격히 떨어져 분해능이 나빠지는 문제 가 있다.

X자형과 십자형 사구 조명에 대하여, duty ratio가 1:2(pitch = 0.30 μm)인 LS 패턴에 대하여 위와 비슷하게 조명 조건을 달리하여 계산하면, 십자형 사구 조명에서는 계산된 DOF가 모두 0이다. 그러나, duty ratio 1:1의 dense 패턴에서는 계산

된 DOF가 모두 0이던 X자형 사구 조명의 경우, duty ratio가 1:2로 늘면, 그림 5와 같은 DOF 값을 얻을 수 있다.

그런데, duty ratio가 1:3(pitch = 0.40 μm)인 경우에 대하여 마찬가지로 X자형과 십자형의 사구 조명을 적용하면, 다시 X 자형 사구 조명에서는 계산된 DOF가 모두 0으로 나타나고 십자형 사구 조명에서만 비록 작더라도 DOF가 계산되어지는

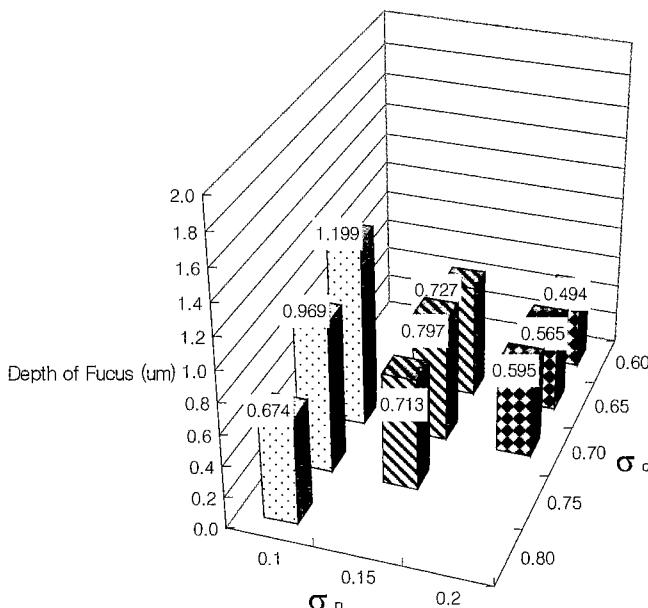


그림 5. Duty ratio 1:2인 LS 패턴에서의 초점심도. X자형 사구조명의 경우.

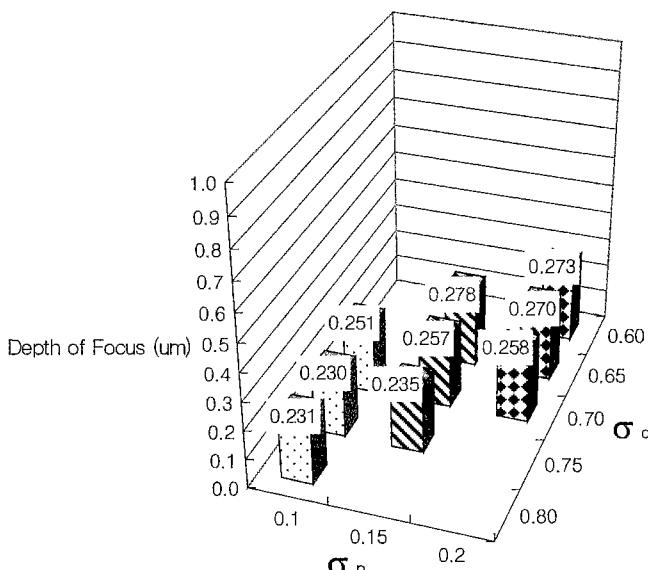


그림 6. Duty ratio 1:3인 LS 패턴에서의 초점심도. 십자형 사구조명의 경우.

것을 알 수 있다.

DRAM 등에서 자주 쓰이는 capacitor 패턴의 경우, 일반적으로 X자형 사구 조명을 사용하는 것이 환형 조명을 사용할 때에 비해서 보다 좋은 분해능을 갖는 것으로 알려져 있다.^[14] 그러나, 패턴의 크기가 $0.1 \mu\text{m}$ 급으로 아주 작아지면, 위에서 예상하는 바와 같이, duty ratio가 1:1인 dense 패턴에서 X자형 사구 조명이 상을 만들지 못하기 때문에, 문제가 있을 것으로 예상된다. 특히, capacitor 패턴은 그림 2와 같이 x축 방향과 y축 방향의 크기 비가 보통 3:1인데, y축 방향으로는 duty ratio가 1:1인 LS 패턴으로, x축 방향으로는 duty ratio가 1:3인 SL(space & line) 패턴으로 인식할 수 있다. 따라서,

capacitor 패턴에서는 X자형 사구 조명보다는 십자형 사구 조명이나 환형 조명만이 상을 만들 수 있는 분해능과 DOF를 확보할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

이를 확인하기 위해, 앞서의 여러 가지 OAI 조건에 따라 결상 계산을 수행한 결과, 보조 패턴을 포함하지 않은 원형의 capacitor 패턴에서는 어떤 조명 조건도 DOF를 형성하지 못했다. 이때, 앞선 절(2절 참조)에서 언급한 바와 같이, CD 허용 오차를 $\pm 10\%$ 로, 노광 허용 오차를 $\pm 5\%$ (EL : 10%)로 설정하고 E-D tree를 계산하였다. 따라서, 상의 구현을 위해서는 보조 패턴을 이용한 OPC 방법이 반드시 함께 적용해야 함을 알 수 있다.

최적의 OAI 조명 조건을 찾아내는 것과 함께, 보조 패턴의 크기에 대해서도 최적의 조건을 찾기 위해, 크기를 변화시켜 가며 E-D tree를 계산하고 DOF와 cutoff intensity를 구해본 결과는 다음과 같다.

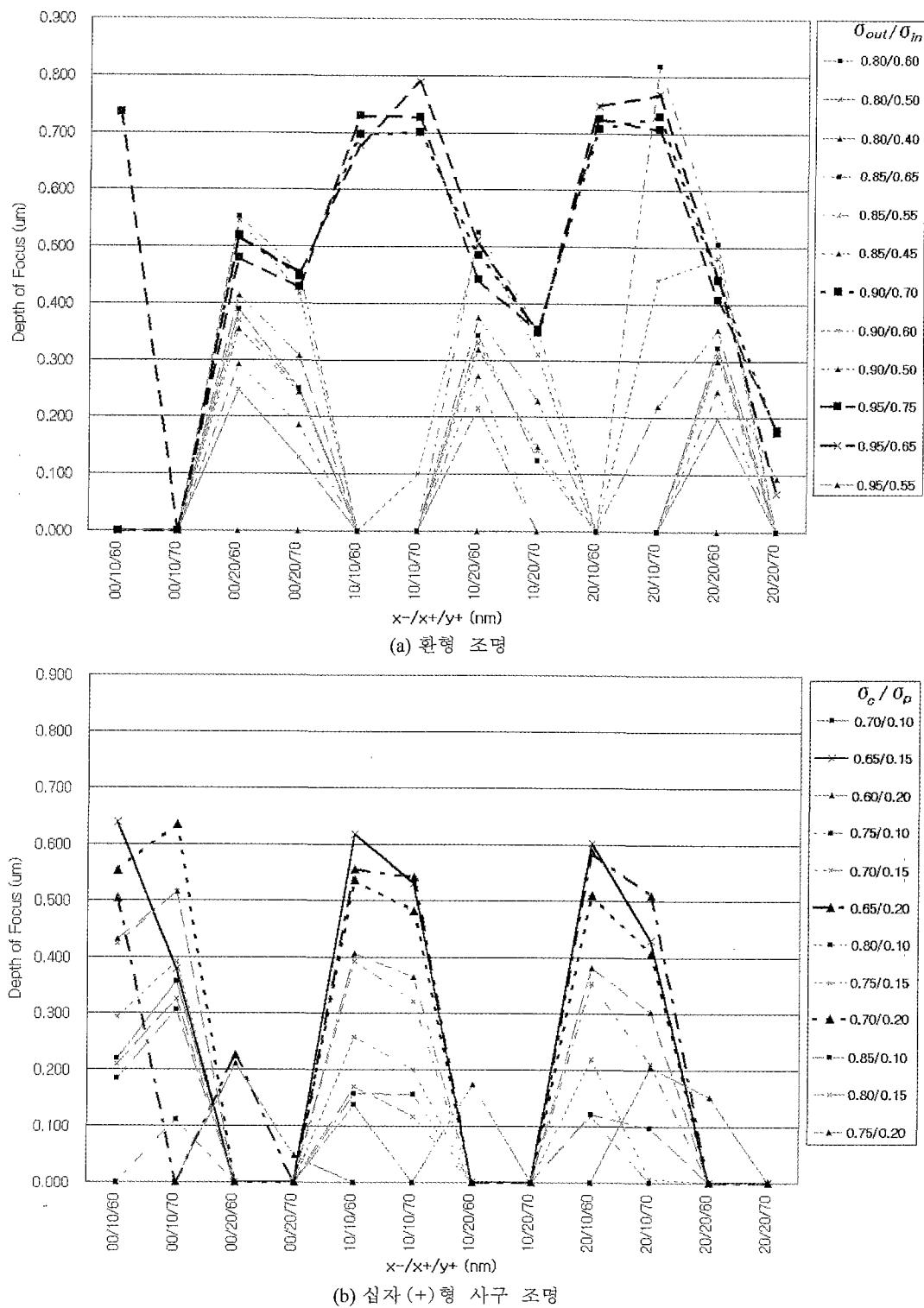
그림 7과 8에서, x축은 그림 2에 제시되어 있는 바와 같이, hammer head 패턴의 크기를 “x+”, “x”, “y+”로 나타낸 것이며 단위는 nm이다. 계산 결과, 예상과 같이 X자형 사구 조명에서는 계산된 DOF가 모두 0으로, 본 연구의 계산 조건에서는 DOF를 구현할 수 없는 것으로 나타났다.

십자형 사구 조명의 경우, DOF와 cutoff intensity 모두 대체적으로 특정한 hammer head 패턴의 크기($x-/x+/y+ = 10/10/60, 10/10/70, 20/10/60, 20/10/70$)에서 좋아지는 경향이 있음을 알 수 있다. 특히, σ_c/σ_p 가 0.65/0.15, 0.65/0.20, 0.70/0.20일 때 DOF와 cutoff intensity 두 측면 모두에서 증가되는 경향과 그 값의 크기가 나머지의 조명 조건보다 두드러지게 좋은 것을 확인할 수 있다.

환형 조명의 경우, 가장 좋은 DOF를 보이는 조명 조건은 σ_{out}/σ_{in} 이 0.90/0.70, 0.95/0.75, 0.95/0.65일 때이고, 십자형 사구 조명의 경우와 마찬가지로 hammer head 패턴의 크기($x-/x+/y+ = 10/10/60, 10/10/70, 20/10/60, 20/10/70$)에서 뚜렷한 증가 경향을 보이고 있다. 그러나, 나머지 조명 조건들에서는 이와 달리, $x-/x+/y+$ 가 각각 0.00/20/60, 10/20/60, 20/10/70 혹은 20/20/60일 때 DOF가 증가하는 경향을 보인다. 주목할 점은 σ_{out}/σ_{in} 이 0.90/0.70, 0.95/0.75, 0.95/0.65인 환형 조명의 경우, 다른 조건들과는 달리 hammer head 패턴의 크기에 상관없이 일정 정도의 DOF를 확보하고 있다는 것이다.

환형 조명과 십자형 사구 조명 모두에서 전반적으로 훨씬 좋은 결과를 보이고 있는 세가지 조명 조건(그림 7, 8의 굵은 선)의 결과들을 보다 명확히 하기 위해, 따로 묶어보면 그림 9와 같다.

그림 9에서, 그래프 옆의 값들은 각 조명 조건 중 최대의 DOF를 갖는 조명 조건에서의 결과값들을 나타낸다. 그림 9에서 쉽게 알 수 있듯이, 십자형 사구 조명의 경우에서는 DOF와 cutoff intensity의 증감 경향이, 동일한 크기의 hammer head 패턴($x-/x+/y+ = 10/10/60, 10/10/70, 20/10/60, 20/10/70$)에서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 반면, 환형 조명의 경우, DOF를 최적으로 만들어 주는 hammer head 패턴의 크기는 십자형 사구 조명의 경우와 동일하지만 cutoff intensity를 최적으로 만들어 주는 hammer head 패턴의 크기는 $x-/x+/y+$

그림 7. Hammer head^형 보조 패턴의 크기에 따른 DOF 계산 결과.

=00/20/60, 00/20/70, 10/20/60, 10/20/70 등으로, DOF와 cutoff intensity 사이의 증감 경향이 서로 다르다.

두 조명 조건 모두에서 최적의 DOF 결과를 보이는 hammer head 패턴($x-/x+/y+ = 10/10/60, 10/10/70, 20/10/60, 20/10/70$)에 대하여, DOF의 측면으로 살펴보면, 환형 조명을

이용할 경우가 십자형 사구 조명을 이용할 때에 비해서 값의 분포가 크기 때문에 유리하다. 그러나, cutoff intensity를 살펴보면, 십자형 사구 조명의 경우가 환형 조명의 경우보다 값의 분포가 크기 때문에 유리한 것을 알 수 있다. 일반적으로 DOF는 실제 공정에서 요구되는 최소값보다 크게 얹어질 수만

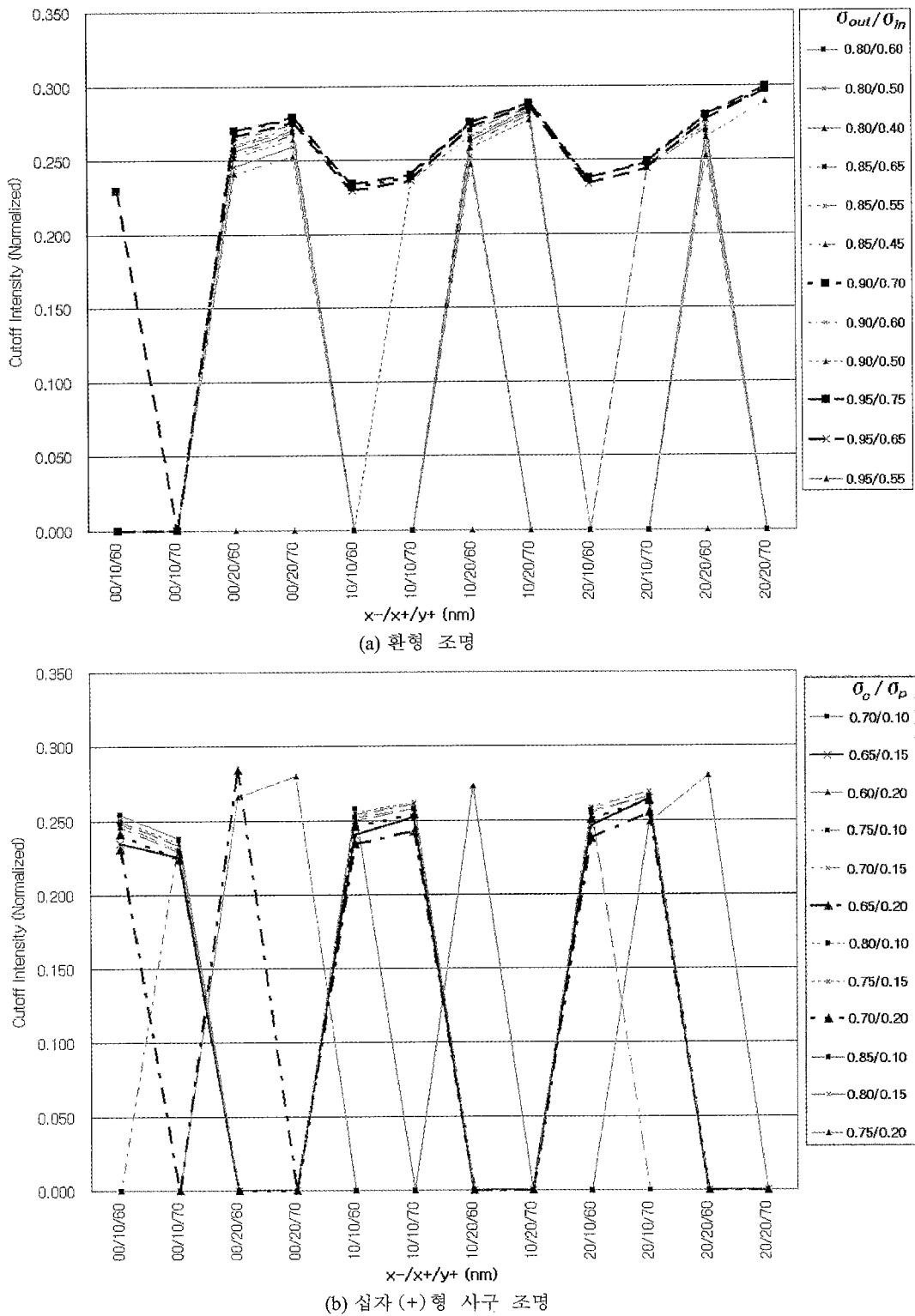


그림 8. Hammer head형 보조 패턴의 크기에 따른 cutoff intensity 계산 결과.

있으면 특별한 문제가 없다. 그러나, cutoff intensity는 형성될 패턴의 CD를 결정하는 요소이고 값이 클수록 intensity와 역수 관계인 노광량이 작아져 실제 공정에 유리하게 된다. 따라서, 이 경우 십자형 사구 조명에서의 DOF 결과가 실제 공정에서 패턴 구현을 위해 요구되는 DOF를 충분히 만족한다면,

환형 조명보다는 십자형 사구 조명을 선택하는 것이 유리하다. 반대로, 그렇지 못한 경우라면 과다 노광량이 더 필요하더라도 환형 조명을 사용해야 한다.

환형 조명과 십자형 사구 조명 모두에서, 전반적으로 계산 결과 구해진 cutoff intensity가 매우 낮기 때문에, 실제 공정

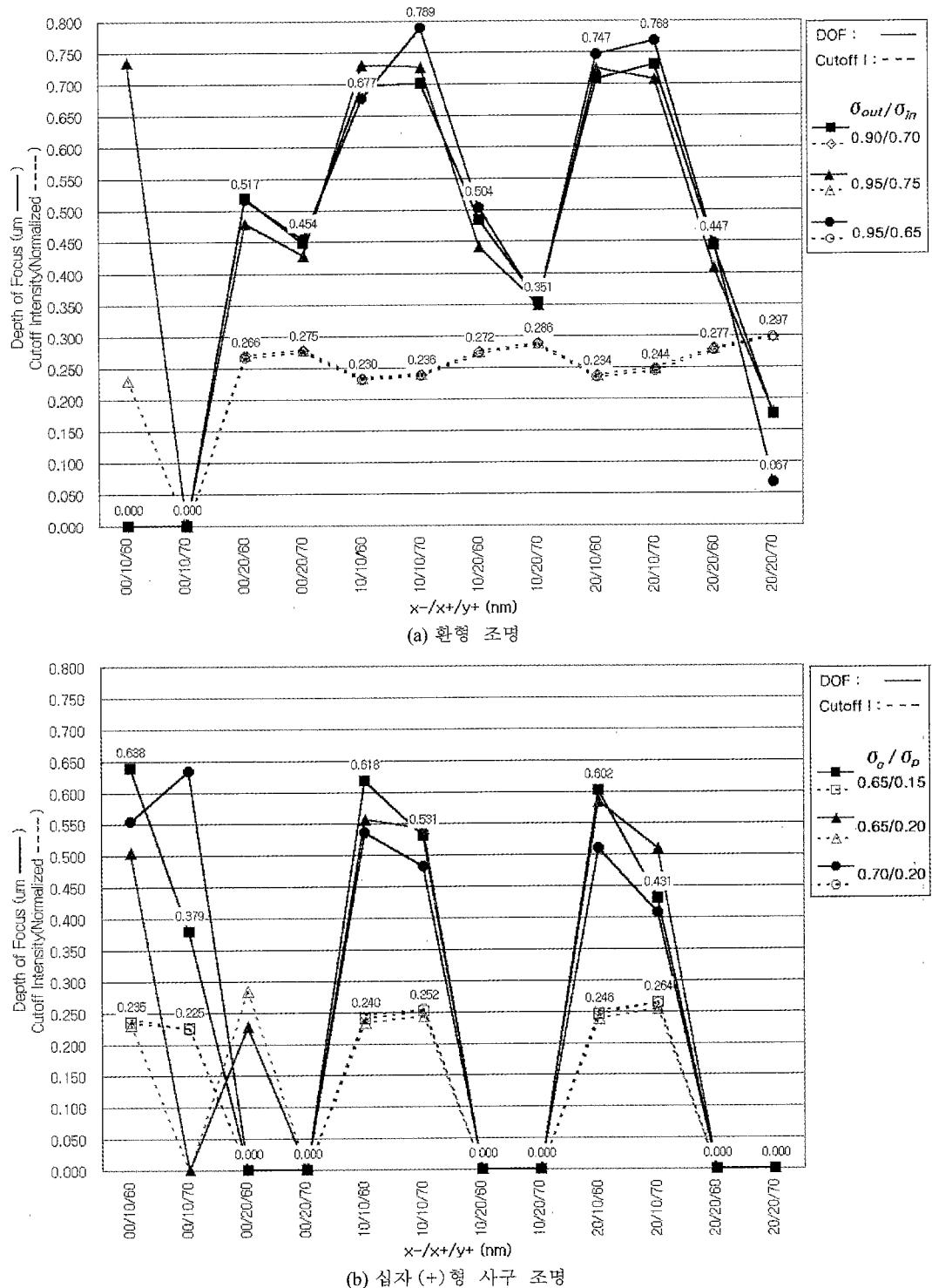


그림 9. 최적 조명 조건에서의 DOF와 cutoff intensity.

상에서는 어느 정도의 과다 노광이 필요한 것을 알 수 있다. 최근의 연구 성향을 보면, 패턴의 구현에 있어서 DOF와 EL 뿐만이 아니라, MEF(Mask Error Factor)^[15,16]의 영향에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있는 것을 알 수 있다. MEF는 마스크 상의 CD 오차가 wafer 상의 CD 오차에 어느 정도 영향을 미치는지를 수치적으로 표현한 것으로, 식 (4)와 같

이 나타낸다.

$$MEF = M \cdot \frac{\partial CD_{wafer}}{\partial CD_{mask}} \quad (4)$$

여기서, M은 광학계의 축소 배율로 보통의 리소그래피 광학계 시스템의 경우 4 혹은 5(4X or 5X)의 값을 갖는다.

주 패턴의 크기가 작아짐에 따라, OPC를 위한 보조 패턴의 크기도 작아짐으로 해서, 실제의 마스크를 만들어 내는 것에도 상당한 어려움이 따른다. 따라서, OPC가 적용된 경우, 마스크 제작에서 정확한 CD를 구현하지 못할 위험이 존재하기 때문에 어느 정도 보조 패턴의 크기 변화에도 원하는 상이 나올 수 있도록 하는 것이 중요하다.

이번 연구의 결과를 보면, 특정한 조명 조건에서는 어느 정도의 보조 패턴의 크기 변화에서도 일정한 DOF와 cutoff intensity의 확보가 가능함을 알 수 있는데, 이를 통해서 위에 언급한 MEF를 최소화 할 수 있는 최적의 보조 패턴의 크기 도 정할 수 있다. 예를 들어, 본 연구의 결과를 보면, 십자형 사구 조명이나 환형 조명의 특정 조건에서는 $x-x+y+i$ 각각 10/10/60, 10/10/70, 20/10/60, 20/10/70인 경우 일정한 DOF와 cutoff intensity를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 이를 바탕으로, $x-x+y+i$ 각각 15/10/65를 목표로 한다면, (10-20)/(5-15)/(60-70) 사이의 패턴 변화에 따른 MEF의 영향 아래에서도 적절한 DOF와 cutoff intensity를 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

IV. 결 론

이번 연구에서는, 광학적 분해능의 한계를 벗어나는 0.1 μm 금 패턴의 구현을 위해 필요한 최적의 조명 조건과 OPC에 의한 보조 패턴의 최적 크기에 대하여 DOF와 cutoff intensity의 측면으로 살펴보았다. 0.1 μm 금 이상의 capacitor 패턴에서 보다 효과적이라고 알려져 있는 전통적인 X자형 사구 조명이, 선폭이 0.10 μm 이고 duty ratio가 1:1인 dense LS패턴이나 capacitor 패턴에서 전혀 DOF를 구현할 수 없고 환형 조명과 십자형 사구 조명을 적용해야 함을 밝혔다. 이와 더불어, 기본 capacitor 패턴에 OPC를 적용한 hammer head 형 보조 패턴을 추가할 때 조명 조건에 따른 최적의 hammer head 패턴 크기를 알아보았다. 그 결과, 적절한 조명 조건에서는 보조 패턴의 약간의 크기 변화에 대해서도 일정한 정도의 DOF와 cutoff intensity를 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로는 PR의 특성을 반영한 diffusion 함수를 고려한 결상 계산을 수행함으로 해서, 실제의 실험 결과에 유사한 결상 결과를 통해 DOF 등을 확인할 필요가 있다. 또한, 광학계가 high NA로 가면서 수차에 의한 영향도 함께 커질 것이 분명 하므로, 이를 고려한 경우에 대한 연구도 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비(ISRC-98-E-1413)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] K. Kamon, T. Miyamoto, Y. Myoi, H. Nagata, M. Tanaka, and K. Horie, "Photolithography system using annular illumination," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 30, no. 11B, pp. 3021-3029, 1991.
- [2] 박정보, 이성목, "패턴 분해능 및 초점심도 향상에 대한 사입사 조명(Off-Axis Illumination)의 효과에 관한 연구," *한국광학회지*, 제10권 6호, pp. 453-458, 1999.
- [3] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson, "Improving resolution in photolithography with a phase-Shifting Mask," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol ED-29, pp. 1828-1836, 1982.
- [4] J. F. Chen, T. Laidig, K. E. Wampler, R. Caldwell, "Practical method for full-chip optical proximity," in *Optical Microlithography X*, G. E. Fuller, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3051, pp. 790-803, 1997.
- [5] O. Otto, J. Garafalo, K. Low, C. Yuan, R. Henderson, C. Pierrat, R. Kostelak, S. Vaidya, and P. Vasudev, "Automated optical proximity correction: a rules-based approach," in *Optical/Laser Microlithography VII*, T. A. Brunner, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 2197, pp. 278-293, 1994.
- [6] J. Stirniman and M. Rieger, "Spatial filter models to describe IC lithographic behavior," in *Optical Microlithography X*, G. E. Fuller, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3051, pp. 469-478, 1997.
- [7] S. R. J. Brueck and X. Chen, "Spatial frequency analysis of optical lithography resolution enhancement techniques," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, no. 3, pp. 908-920, 1999.
- [8] B. J. Lin, "The Exposure-Defocus Forest," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33, pp. 6756-6764, 1994.
- [9] J. F. Chen, T. Laidig, K. E. Wampler, and R. Caldwell, "Practical method for full-chip optical proximity," in *Optical Microlithography X*, G. E. Fuller, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3051, pp. 790-803, 1997.
- [10] J. F. Chen, T. Laidig, K. E. Wampler, and R. Caldwell, "Optical proximity correction for intermediate-pitch features using sub-resolution scattering bars," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 15, no. 6, pp. 2426-2433, 1997.
- [11] W. Maurer, C. Dolainsky, J. Thiele, C. Friedrich, and P. Karakapsanis, "Process proximity correction using an automated software tool," in *Optical Microlithography XI*, L. van den Hove, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3334, pp. 245-253, 1998.
- [12] B. W. Smith, L. Zavyalova, and J. S. Petersen, "Illumination pupil filtering using modified quadrupole apertures," in *Optical Microlithography XI*, L. van den Hove, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3334, pp. 384-394, 1998.
- [13] X. Chen and S. R. J. Brueck, "Experimental comparison of off-axis illumination and imaging interferometric lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 17, no. 3, pp. 921-929, 1999.
- [14] S. Nakao, K. Tsujita, I. Arimoto, and W. Wakamiya, "Imaging characteristics of 0.12 μm dynamic random access memory pattern by KrF excimer laser lithography," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 12B, pp. 6985-6993, 1999.
- [15] A. K. Wong, R. A. Ferguson, L. W. Liebmann, S. M. Manfield, A. F. Molless, and M. O. Neisser, "Lithographic effect of mask critical dimension error," in *Optical Microlithography XI*, L. van den Hove, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3334, pp. 106-116, 1998.
- [16] J. V. Schoot, J. Finders, K. V. I. Schenau, M. Klaassen, and

C. Buijk, "The mask error factor: causes and implications for process latitude," in *Optical Microlithography XII*, L.

van den Hove, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3679, pp. 250-260, 1999.

Research on the optimization of the off-axis illumination condition and OPC sub-resolution pattern size for the 0.1 μm rule dense pattern formation

Jungbo Park, Jaebong Lee, and Sungmuk Lee[†]

Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA

[†]E-mail: sungmuk@snu.ac.kr

(Received December 27, 2000 ; Revised manuscript received May 11, 2001)

In this paper, we have researched the depth of focus (DOF) and cutoff intensity of the 0.1 μm rule dense line&space pattern according to the various off-axis illumination (OAI) conditions in the optical system of 0.65 NA using ArF excimer laser (193 nm). We have also studied the variation of the DOF and cutoff intensity according to the sub-resolution pattern (hammer head type) size for optical proximity correction (OPC) applied to the capacitor pattern and the various OAI conditions in the same optical system. As a result, it is revealed that the cross type quadrupole or annular illumination is preferred to the conventional X type quadrupole for printing the 0.1 μm rule dense pattern. Also, we can investigate the optimal illumination condition and the size of OPC sub-resolution pattern to keep a consistent DOF and cutoff intensity trends.

Classification code : SM.010.