

論文 97-34D-12-9

# 광리소그래피에서 최적 모양의 패턴 구현을 위한 포토마스크 역설계

## (Reverse Design of Photomask for Optimum Fidelity in Optical Lithography)

李在哲\*, 吳用琥\*, 林成禹\*\*

(Jai-Cheol Lee, Yong-Ho Oh, and Sungwoo Lim)

## 요 약

0.2 $\mu\text{m}$ 이하의 최소 선폭이 필요한 Giga-bit급 DRAM의 양산에는 ArF 엑시머 레이저를 광원으로 한 광리소그래피가 사용될 것으로 예측된다. 이 경우, 광리소그래피의 해상 한계에서 공정이 이루어지기 때문에 패턴의 왜곡 현상이 심해지게 된다. 전통적으로 상(image)의 왜곡 현상을 감안한 포토마스크의 설계는 공정 시뮬레이션이나 공정 실험 등 많은 시행 착오를 거쳐야 하는 작업이었으므로 많은 시간과 노력이 필요하였다. 이 논문에서는 왜곡 현상을 고려한 최적의 마스크의 패턴 탐색 작업을 자동화하는 프로그램을 보였다. 제안된 프로그램은 마스크 평면을 균일한 크기의 여러 개의 셀로 나눈 후 무작위적으로 셀의 투과/불투과성을 변환하여 원하는 패턴에 근접하는 패턴을 구하도록 하였다. 이 프로그램을 기본적인 DRAM 셀 패턴에 적용시켜 수행해 본 결과 원래의 마스크 패턴보다 목표 상에 근접한 마스크 패턴을 효과적으로 구현할 수 있었다.

## Abstract

The optical lithography with an ArF excimer laser as a light source is expected to be used in the mass production of giga-bit DRAMs which require less than 0.2 $\mu\text{m}$  minimum feature size. In this case, the distortion of a patterned image becomes very severe, since the lithography process is performed at the resolution limit. Traditionally, the photomask pattern was designed and revised with trial-and-error methods, such as repeated execution of process simulators or actual process experiments which require time and effort. This paper describes a program which automatically finds an optimal mask pattern. The program divides the mask plane into cells with same sizes, chooses a cell randomly, changes the transparent/opaque property of the cell, and eventually generates a mask pattern which produces required image pattern. The program was applied to real DRAM cell patterns to produce mask patterns which generates image patterns closer to object images than original mask patterns.

\* 正會員, 圓光大學校 半導體學科

(Dept. of Semiconductor Science, Wonkwang University)

\*\* 正會員, 圓光大學校 物理學科

(Dept. of Physics, Wonkwang University)

※ 이 연구는 1996년 원광대학교 교비 지원에 의해 수행되었습니다.

接受日: 1997년 9월 9일, 수정완료일: 1997년 10월 30일

## I. 서론

현재 기가 비트(giga-bit)급 DRAM의 리소그래피 기술 추세는 0.18 $\mu\text{m}$ 의 최소 선폭이 필요한 1 Giga-bit DRAM의 패턴 형성에는 엑시머 레이저를 사용한 광리소그래피 기술이 사용될 것으로 예측된다<sup>1)</sup>. 또한, 이 광리소그래피 기술을 0.15 $\mu\text{m}$  이하의 최소 선폭이 요구되는 4 Giga-bit DRAM에까지 연장하여 사용하기 위하여 위상 이동 마스크(phase shift

mask)<sup>[2]</sup>, 변형 조명(modified illumination)<sup>[3],[4]</sup> 등의 많은 연구가 진행되고 있다.

그러나, 이와 같은 경우 광리소그래피의 해상 한계 근처에서 공정이 이루어지기 때문에 공정의 여유도가 극히 작아지게 된다. 또한, 패턴의 집적도가 커짐에 따라 현재까지는 반복 패턴의 주변 회로 부근에서나 필요했던 근접효과의 보정 및 마스크 재설계가 앞으로는 기본 셀(cell) 패턴에 대해서도 필히 수반되어야 할 것이다.

현재까지 근접효과에 대한 보정은 Athena<sup>[5]</sup> 등의 상용 시뮬레이션 툴을 이용한 시뮬레이션과 공정 실험 등의 방법을 시행 착오적으로 반복함으로써 이루어져 왔다. 이와 같은 방법은 마스크 패턴과 리소그래피 기술이 가지는 많은 공정 변수를 공정 전문가가 탐색하는 방법이므로 많은 반복을 통해서만 원하는 결과를 얻을 수 있다.

현재까지는 시뮬레이션을 도입하여 공정 실험 횟수를 줄인 것만으로도 비용과 시간의 절감 효과를 이룰 수 있었으나 Giga-bit급 DRAM의 리소그래피에는 변형 조명, 위상 이동 마스크 등의 복잡한 변수가 추가되므로 기존의 방법으로 공정 변수를 확인하여 마스크를 재설계하는 것은 많은 시간과 비용이 필요하게 되어 적용하기 힘든 방법이 될 것이다.

이 논문에서는 광리소그래피의 노광 장치를 통하여 웨이퍼에 형성되는 마스크의 상(image)을 분석하여 목적하는 패턴의 형상에 가장 적합한 상을 주는 마스크의 설계 변수를 자동적으로 찾아 내는 프로그램에 대하여 보고한다.

제안된 프로그램은 마스크 평면을 균일한 크기의 셀로 나눈 후, 셀의 투과/불투과성을 몬테-칼로(Monte-Carlo) 기법을 사용하여 무작위적으로 바꾸어 원하는 결상을 만드는 마스크 패턴을 만들도록 하였다. 개발된 프로그램을 몇 가지 실제 예에 적용하여 원하는 결상에 근접한 상을 만드는 마스크 패턴을 만들 수 있음을 보였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 광리소그래피에서 결상 왜곡 현상이 발생하는 이유에 대하여 설명한다. 제 3 장에서는 제안된 프로그램의 구조와 동작 원리에 대하여 설명한다. 제 4 장에서는 프로그램을 실제 마스크 패턴에 적용한 예를 보였으며 제 5 장에서는 프로그램의 한계와 향후 개발 방향에 대하여 기술한다.

## II. 광리소그래피에서의 결상 왜곡

그림 1에 광리소그래피 시스템의 개략도를 보였다. 광리소그래피에서는 일반적으로 포토마스크의 패턴을 광학 렌즈를 통하여 웨이퍼에 복사하는 방법을 사용하고 있다. 집광 렌즈에 의해 집중된 빛은 마스크를 거치게 되며 마스크의 투과/불투과 형상이 웨이퍼 표면 위에 도포된 포토레지스트(photo-resist)에 전사된다. 마스크 패턴의 크기가 빛의 파장에 비해 큰 경우에는 문제가 없었으나 패턴의 크기가 작아지면서 빛의 회절, 간섭 등에 의해 마스크 패턴을 정확하게 투영하는 것이 매우 어려워지고 있다.

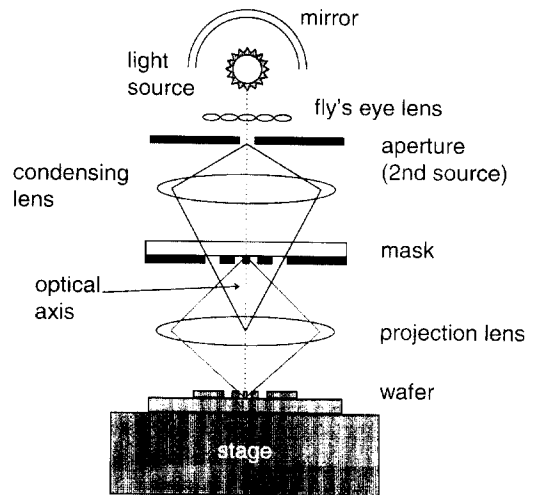


그림 1. 광리소그래피 시스템 개략도  
Fig. 1. A Schematic diagram of optical lithography system.

이와 같은 현상은 공간 주파수 대역에서 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 마스크 패턴이 메모리 셀과 같이 일정한 주기로 반복되는 경우 마스크 패턴은 공간 주파수 대역 위에 푸리에 급수로 표현할 수 있으며 상을 투영시키는 광학계가 공간 주파수에 대해 저대역 필터(low-pass filter)로 작용하여 낮은 차수의 공간 주파수만을 전사하기 때문에 웨이퍼에 맺히는 상은 원래의 모양에서 왜곡된 형태가 나타난다.

이 영향은 뒤에 보인 바와 같이 사각형 모양의 마스크를 사용했을 경우, 높은 주파수 부분, 즉 모서리 부분이 투과되지 않으므로 원형의 패턴을 보이게 된다. 마스크 패턴의 크기(또는 주기)가 큰 경우에는 기본 공간 주파수가 낮으므로 비교적 많은 차수의 주파수가

지 투과가 가능하여 원래의 패턴과 유사한 상이 맺히게 된다. 그러나 패턴의 크기가 작아지면 공간 주파수가 높아지므로 투과되는 주파수의 갯수가 감소하며 따라서 왜곡은 점점 심해지게 된다. 따라서 반도체 소자의 집적도가 증가함에 따라 투영 광학계를 사용하는 광리소그래피에서 필연적으로 수반되는 이러한 패턴의 왜곡 현상이 점점 심해지게 되고 소자의 특성에 지대한 영향을 끼치는 CD(critical dimension)의 오차 허용 범위의 많은 부분을 차지하게 되어 공정의 어려움을 가중시키게 된다.

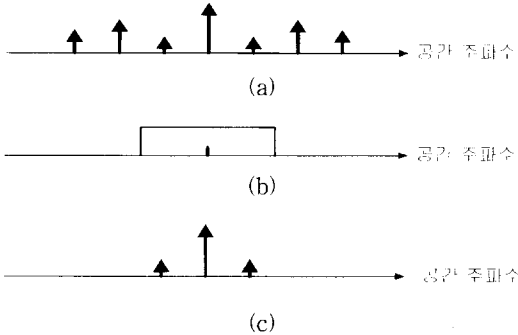


그림 2. 광리소그래피 시스템의 공간 주파수 대역 증가도

(a) 마스크 패턴의 푸리에 급수 표현 (b) 리소그래피 시스템의 주파수 표현 (c) 웨이퍼에 투영된 영상의 푸리에 급수 표현

Fig. 2. Spatial frequency equivalent expression of optical lithography system.

(a) Fourier series expression of a mask pattern (b) Spatial frequency representation of an optical lithography system (c) Fourier series expression of a projected image

이와 같은 현상에 대한 대책으로 광학계의 차원에서는 위상 이동 마스크, 변형 조명 등이 제안되기도 하였다.

어떤 방법을 사용하더라도 왜곡 현상은 피할 수 없으며 왜곡 현상을 감안한 마스크 설계 작업은 매우 긴 시간과 많은 노력이 필요한 일이다. 즉 설계자의 직관과 경험에 의존하여 패턴을 설계한 후 이를 공정 시뮬레이션 또는 실제 공정을 통하여 어떤 모양으로 투영되었는지 확인한 후 이를 다시 설계에 반영하는 반복 작업에 의하여 설계가 이루어진다. 이와 같은 작업은 시간과 노력이 필요한 뿐 아니라 구한 마스크 패턴이 만족스럽지 못할 경우도 많다.

### III. 포토마스크 역설계 프로그램

이 논문에서는 이러한 상의 왜곡 현상을 줄여 원하는 패턴에 가장 가까운 패턴을 자동적으로 찾아내는 프로그램을 개발하였다. 포토마스크 역설계 프로그램은 설계자가 설계한 마스크 패턴 모양을 웨이퍼 위에서의 목표 상(target image)으로 사용하고 현재 마스크 패턴이 투사되었을 때의 상과의 차이를 매력 함수(merit function)로 사용하여 이 매력 함수를 최소화하는 방법을 택하였다.

```

user input
  lithography parameters;
  illumination method;
  mask pattern;
determine the symmetry of mask pattern;
divide mask plane by N cells c(.);
k=0;
calculate merit function fmerit0;
loop
  select random cell c(i);
  if c(i) is opaque
    c(i) is transparent;
  else
    c(i) is opaque;
  if symmetry
    flip symmetric cells;
  calculate fmeritk+1;
  if fmeritk+1 < fmeritk
    keep change;
  else
    undo flip;
  k=k+1;
until no improvement for K selections;

```

그림 3. 포토마스크 역설계 알고리즘

Fig. 3. Algorithm for photomask reverse design.

그림 3에 포토마스크 역설계 프로그램의 알고리즘을 개략적으로 보였다. 사용자가 노광 장치의 특성인 광원의 파장( $\lambda$ ), 렌즈의 개구수(NA), 조명의 방법과 크기를 정의하고 원하는 설계 모양을 입력한다. 입력 자료를 검색하여 입력 패턴의 대칭성을 검색한 후 마스크 평면을 균일한 크기의 셀로 분할한다. 분할된 셀은 목표 상의 성질에 따라 불투과(opaque) 셀과 투과(clear) 셀로 분류한다. 제안된 프로그램은 분할된 셀을 무작위로 선택하여 각 셀의 투과/불투과성을 바꾸어 보면서 웨이퍼 위에서의 빛의 강도를 계산하여 목표 상에 가장 적합한 마스크의 모양을 찾아내는 방법을 택하였다.

무작위로 셀을 선택한 뒤 셀이 투과(clear)성이면 불투과(opaque)로, 불투과성이면 투과로 바꾼다. 바꾸어진 마스크 패턴을 사용하여 웨이퍼 위에서의 빛의 강도를 다시 계산하여 웨이퍼에 현상될 상의 모양을 예측한다. 현상될 상의 모양이 목표 상에 가까워지면 현재의 마스크 패턴을 저장하나(hit) 반대의 경우(miss) 시험적인 선택 결과를 버리고 원래의 마스크 패턴으로 되돌아간다. 이 때, 입력 패턴에 대칭성이 있는 경우에는 입력 패턴의 대칭성에 따라 대칭 위치에 있는 여러 개의 셀을 한번에 택하여 셀의 투과/불투과 성질을 결정함으로써 역설제되는 마스크의 대칭성을 유지시킨다.

이와 같은 Monte-Carlo 시험 방법을 사용자가 정한 최대 횟수에 도달하거나 또는 주어진 횟수만큼 연속적으로 miss가 발생할 경우 정지한다. 이 때 웨이퍼에 맺힌 상과 목표 상과의 유사성을 판단할 수 있는 매력 함수를 정의하는 일이 중요한 문제인데 본 프로그램에서는 두 상의 면적 차이를 매력 함수로 정의하여 이를 최소화하는 방법을 택하였다.

IV. 프로그램 수행 결과의 예

마스크 역설제 알고리즘을 C 언어로 프로그래밍하여 실제 마스크 패턴에 적용하였다. 예제는 DRAM의 기본 셀 패턴인 접촉 구멍(contact hole) 패턴과 비트선(bit-line) 패턴의 두 가지 경우이다. 컴퓨터로는 Windows 95 운영 체제를 갖춘 166MHz의 클럭과 32MByte의 RAM을 가진 펜티엄 PC를 사용하였다. 두 경우 모두 수행 시간은 10분 이내이다.

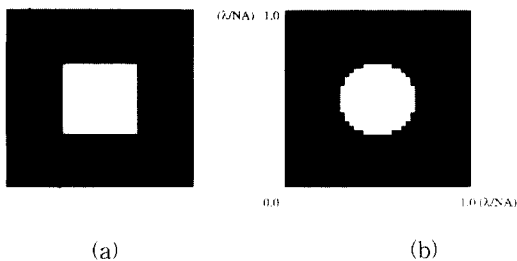


그림 4. 최적화 전의 접촉 구멍 모양  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상  
Fig. 4. Contact hole pattern-before optimization.  
(a) Mask pattern (b) Projected image

그림 4는 접촉 구멍(contact hole) 패턴을 투사하

였을 때, 웨이퍼에 맺히는 상을 보였다. 모든 크기는 파장( $\lambda$ )과 개구수(NA: Numerical Aperture)의 비율로 나타내었다. 구멍 패턴의 크기는  $0.4(\lambda/NA)$ 를 택하였으며 패턴의 주기는  $1.0(\lambda/NA)$ 이다. 이미 앞에서 설명한 바와 같이 공간 주파수 대역의 고주파 성분이 투과 되지 않으므로 웨이퍼에 맺히는 상의 모양이 정사각형에서 완전히 왜곡되어 거의 원형이 됨을 알 수 있다

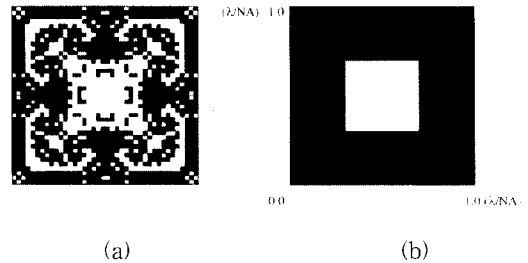


그림 5. 최적화된 접촉 구멍 모양  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상  
Fig. 5. Optimized contact hole pattern.  
(a) Mask pattern (b) Projected image

그림 5(a)에는 개발된 프로그램을 적용하여 역설제된 마스크 모양을 보였다. 이 경우 그림 5(b)에 보인 바와 같이 역설제한 마스크가 웨이퍼 위에서는 원래의 목적했던 모양대로 상을 맺히게 함을 알 수 있다. 또한 역설제한 마스크의 모양이 원래 마스크 패턴의 대칭성을 그대로 유지하고 있음이 나타난다. 그러나 이와 같은 마스크 패턴은 지나치게 사각형의 수가 많으므로 마스크 생산 가격이 비싸질 가능성이 있다. 이 문제의 개선을 위해 새로운 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 보인다.

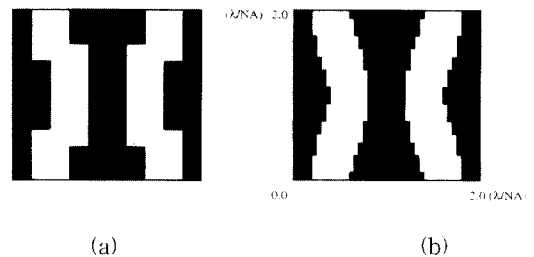


그림 6. 최적화 전의 비트선 모양  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상  
Fig. 6. Bit line pattern-before optimization.  
(a) Mask pattern (b) Projected image

그림 6(a)는 일반적으로 사용되는 비트선(bit line)

의 마스크 패턴이며 그림 6(b)에는 웨이퍼에 투사된 상을 보였다. 그림 4의 결과와 마찬가지로 굴곡이 완만해졌으며 이에 따라 선의 두께와 간격 등 CD (Critical Dimension)이 매우 심하게 왜곡되었음을 알 수 있다.

그림 7(a)는 최적화된 비트선 패턴이다. 이에 의해 그림 7(b)와 같은 상이 얻어진다. 투사된 상은 원하는 비트선 패턴과 일치하지 않는다. 이를 통해 개발된 프로그램은 주기가 작은 반복 패턴보다는 고립 패턴에 대해서 역설계의 효과가 더욱 뛰어남을 알 수 있다. 그러나 중요한 점은 역설계한 마스크가 원래의 마스크보다 목표 상에 더 근접한 상을 맺게 할 뿐만 아니라 선의 두께와 간격 등 CD는 정확하게 재현하고 있다는 것이다.

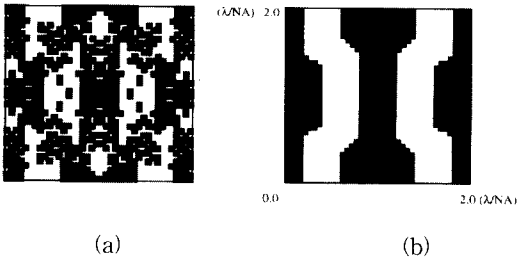


그림 7. 최적화된 비트선 모양

(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상

Fig. 7. Optimized bit line pattern.

(a) Mask pattern (b) Projected image

## V. 결론

본 연구에서는 광리소그래피에서 필연적으로 발생하는 상의 왜곡 현상을 줄이기 위한 포토마스크 패턴을 자동으로 변형시켜 주는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 기본적인 DRAM 셀 패턴에 적용시켜 수행해 본 결과 역설계된 마스크 패턴이 원래의 마스크보다 목표 상을 효과적으로 구현할 수 있었다. 이 때, 역설계 효과는 반복 패턴 보다는 고립 패턴에 가까울수록 더욱 뛰어남이 보였다.

이 논문에서 제시한 방법의 단점으로는 마스크 패턴이 지나치게 복잡해지므로 마스크 제작 비용이 비싸지는 문제점을 들 수 있다. 이를 개선하기 위하여 보다 간단한 패턴을 얻을 수 있는 방법을 모색 중이다. 현재는 투사된 상이 원하는 상과 일치하는 것만을 최적화의 목적으로 삼았으나 실제 공정에 도입하기 위해서

는 공정 여유도(process margin)를 향상시킬 수 있는 방안도 필요하며 이에 대한 연구가 진행 중이다. 또한 변형 조명과 위상 이동 마스크 등의 기법에도 적용할 수 있는 방법에 대한 연구를 계획하고 있다.

## 참고 문헌

- [1] 오용호, 이재철, 이충훈, Giga-Bit DRAM 시대의 리소그래피 기술, 원광대학교 기초과학연구지, 제14권 제1호, pp. 51-57, 1995년 9월
- [2] 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, no. 12, pp. 1828-1836, Dec. 1982.
- [3] T. A. Brunner, Rim phase-shift mask combined with off-axis illumination: a path to 0.5λ/NA geometries, *Proc. SPIE*, vol. 1927, pp. 54-62, 1993.
- [4] D. M. Newmark, J. Garofalo, and S. Vaidya, Aerial image base design of rim phase-shift masks with annular illumination, *Proc. SPIE*, vol. 1927, pp. 63-78, 1993.
- [5] Silvaco International, Athena User Manual, 1995.

## 저 자 소 개



李在哲(正會員)

1957년 11월 14일생. 1980년 2월 서울대학교 전자공학과(공학사). 1982년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1992년 12월 Univ. of Wisconsin-Madison 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사). 1982

년 3월 ~ 1986년 8월 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 1993년 2월 ~ 1994년 2월 현대전자 반도체연구소 책임연구원. 1994년 3월 ~ 현재 원광대학교 반도체학과 조교수. 주 관심 분야는 VLSI 설계 및 CAD



吳用瓏(正會員)

1962년 11월 4일생. 1985년 2월 서울대학교 물리학과(이학사). 1987년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학석사). 1991년 2월 한국과학기술원 물리학과(이학박사). 1991년 7월 ~ 1995년 3월 한국전자통신연구소 반

도체연구소 선임연구원. 1995년 3월 ~ 현재 원광대학교 반도체학과 조교수. 주 관심분야는 리소그래피 및 플라즈마 공정 및 장비

林成禹(正會員)

1958년 2월 14일생. 1980년 2월 서울대학교 물리학과(이학사). 1987년 8월 Temple University 물리학과(이학박사). 1988년 3월 ~ 현재 원광대학교 물리학과 부교수. 주 관심분야는 TCAD