

論文98-35D-10-10

# 몬테-칼로 기법을 사용한 포토마스크의 결상 왜곡 보정

## (Optical Proximity Correction of Photomask with a Monte-Carlo Method)

李在哲\*, 吳用琥\*, 林成禹\*\*

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

## 요 약

반도체 칩 내의 최소 선폭이 작아짐에 따라 광리소그래피에서 필연적으로 발생하는 상(image)의 왜곡 현상이 점점 심각해지고 있다. 이에 따라 광리소그래피의 해상 한계에서 발생하는 패턴의 왜곡 현상에 대한 보정(Optical Proximity Correction)은 이제 불가피한 기술이 되고 있다. 본 논문에서는 몬테-칼로 기법을 사용하여 왜곡 현상을 고려한 최적의 마스크의 패턴을 찾는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램을 기본적인 실제 메모리 셀 패턴에 적용시켜 수행해 본 결과 원래의 마스크 패턴보다 목표 상에 근접한 마스크 패턴을 효과적으로 구현할 수 있었을 뿐 아니라 공정 여유도의 향상도 기대할 수 있게 되었다.

## Abstract

As the minimum feature size of a semiconductor chip gets smaller, the inevitable distortion of patterned image by optical lithography becomes the limiting factor in the mass production of VLSI. The optical proximity correction (OPC), which corrects pattern distortion that originates from the resolution limit of optical lithography, is becoming indispensable technology. In this paper, we describe a program that corrects optical proximity effect and thus finds the optimum mask pattern with a Monte-Carlo method. The program was applied to real memory cell patterns to produce mask patterns that generate image patterns closer to object images than original mask patterns, and increase of process margin is expected, as well.

## I. 서론

반도체 칩에 집적된 소자 및 연결선의 최소선 폭이 작아짐에 따라 자외선을 이용한 전통적인 리소그래피

기술로는 마스크 패턴의 왜곡현상을 피하기 힘들게 되었다. 즉 최근 사용되고 있는 i-선의 파장이  $0.365\mu\text{m}$  인 반면 최소선폭은  $0.35\mu\text{m}$ 에 달하고 있으므로 빛의 회절, 간섭 등에 의한 패턴의 왜곡은 공정에서 심각한 제약 조건으로 등장하였다. 이와 같은 패턴의 근접에 따른 왜곡 현상(optical proximity effect, OPE)은 앞으로 최소선폭이 작아짐에 따라 더욱 심각해질 것으로 예상된다. OPE를 최소화하고 리소그래피 장비의 수명을 연장하기 위하여 위상 이동 마스크(phase shift mask, PSM)<sup>[1]</sup>, 변형 조명(modified illumination)<sup>[2, 3]</sup> 등의 많은 연구가 진행되고 있으나 보다 근본적인 해결책으로 근접효과에 의한 패턴의 왜곡

\* 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 1997년 원광대학교 교비 지원에 의해 수행되었습니다.

接受日字:1998年3月13日, 수정완료일:1998年9月1日

현상에 대한 보정(optical proximity correction, OPC)이 필요하다.

OPC 기술은 메모리 주변 회로에서 여러 개의 패턴이 근접한 곳과 고립 패턴에서 현상된 패턴 크기의 차이, 즉 주요 지점 선평 오차 (critical dimension(CD) offset)에 대한 보정 및 패턴의 모서리나 선의 끝이 둥글게 변형되는 현상에 대한 보정을 위해 주로 사용되고 있다. 그러나 집적도가 커짐에 따라 현재까지는 반복 패턴의 주변 회로 부근에서나 필요했던 이 기술이 앞으로는 기본 셀(cell) 패턴 등 모든 패턴에 대해서도 필요 수반되어야 할 것이다.

기가 비트(giga-bit)급 DRAM의 경우,  $0.18\mu\text{m}$ 의 최소 선평이 필요한 1 기가 비트 DRAM의 패턴 형성에는 엑시머 레이저를 사용한 광리소그래피 기술이 사용될 것으로 예측된다<sup>[4]</sup>. 이와 같은 경우 광리소그래피의 해상 한계 근처에서 공정이 이루어지기 때문에 패턴의 왜곡과 이에 따른 공정 여유도의 감소가 양산의 큰 제약 조건이 될 것이다. 따라서 리소그래피의 왜곡을 감안한 패턴의 보정은 필수적이 될 것이다.

근접 효과 보정은 메모리 제품을 중심으로 시작되었으나 최근 시스템 IC의 설계 규칙이  $0.35\mu\text{m}$ 으로, 또  $0.25\mu\text{m}$ 로 미세화 됨에 따라 시스템 IC에서도 피할 수 없는 추세로 받아들여지고 있다. 다음 세대의 시스템 IC는 레이아웃 설계 시, 또는 설계 후에 근접 효과에 대한 보정을 하지 않고서는 성능과 수율을 기대하기 힘들 것이다.

이 논문에서는 광리소그래피의 해상 한계에서 발생하는 패턴의 왜곡 현상을 감안한 최적의 마스크 패턴을 찾아주는 프로그램을 개발하였으며 실제 마스크 패턴에 적용하여 효과가 뛰어난 것을 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.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 광리소그래피에서 결상 왜곡 현상이 발생하는 이유에 대하여 설명하고 현재 개발된 여타 방법을 분류하여 보인다. 제 3 장에서는 제안된 프로그램의 수학적 모델과 연산 기법 및 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. 근접 효과의 보정

광리소그래피 시스템에서는 마스크 패턴을 통과한 빛이 광학 렌즈를 거쳐 웨이퍼에 투사된다. 이 때, 상을 투영시키는 광학계가 저대역 필터(low-pass filter)로 작용하기 때문에 웨이퍼에 맺히는 상은 원래의 모양에서 왜곡된 형태가 나타난다. 이 영향은 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 주파수까지 투과가 가능하여 원래의 패턴과 유사한 상이 맺히게 된다. 그러나 패턴의 크기가 작아지면 공간 주파수가 높아지므로 투과되는 주파수의 개수가 감소하고 따라서 왜곡은 점점 심해지게 된다.

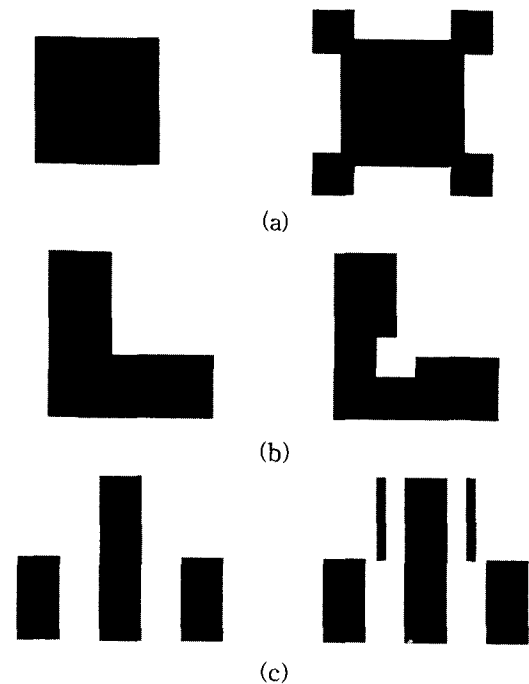


그림 1. 근접 효과 보정에 사용되는 규칙 예  
(a) 모서리 보조 장식 (b) 모서리 감축 (c) 보조 패턴

Fig. 1. Examples of optical proximity correction rules. (a) corner serif (b) corner pullback (c) rigger

현재까지는 이와 같은 왜곡을 해결하기 위하여 짧은 파장의 도입 등 리소그래피 장비의 개발로 이와 같은 문제를 해결해 왔으나 이제 장비의 한계에 도달하여

설계 차원의 접근이 필요하게 되었다. 근접 효과 보정은 이와 같은 왜곡을 감안하여 미리 마스크 모양을 변형하여 웨이퍼에 맺히는 최종 패턴이 원하는 모양이 되도록 하자는 것이다.

근접 효과 보정은 일반적으로 몇 개의 규칙을 정하여 이를 마스크 설계에 반영하는 규칙 위주의 방법(Rule-based Method)과 광리소그래피 시스템의 수학적 모델을 사용하는 모델 위주의 방법(Model-based Method)으로 크게 나누어진다. 그림 1에 일반적으로 사용되는 몇 가지 규칙을 보였다. 그림 1(a)에 보인 모서리 보조 장식(corner serif)은 사각형 패턴의 모서리가 완전한 원형으로 변하는 것을 보완하기 위하여 사용된다. 반대로 그림 1(b)의 모서리 감축(corner pullback)은 모서리가 지나치게 좁아지는 것을 보정하는 데 사용된다. 그림 1(c)의 패턴과 같은 경우 고립된 패턴은 패턴이 모여있는 부분에 비하여 상대적으로 넓게 나타난다. 보조 패턴(rigger)은 이와 같이 고립 패턴과 밀집 패턴의 CD 오차를 보정하기 위하여 사용된다. MaskRigger<sup>[5]</sup>, OPRX<sup>[6]</sup>와 같은 프로그램이 대표적인 규칙 위주의 방법이다. 규칙 위주의 방법은 반복 계산을 하지 않으므로 대형 설계를 빠른 시간 내에 처리할 수 있는 반면 최적의 설계를 기대하기 어렵다는 단점이 있다.

Proteus<sup>[7]</sup>, LIDAS<sup>[8, 9]</sup>와 같은 모델 위주의 OPC 프로그램에서는 광리소그래피 시스템의 모델을 이용하여 반복적으로 근접 효과에 대한 보정을 취하는 귀환 시스템 방법을 사용하고 있다. 모델을 사용하면 반복 계산을 통하여 보다 최적에 근접한 패턴의 보정이 기대되는 반면, 광리소그래피 시스템 모델을 통하여 공간 이미지를 계산하는 데 많은 계산 시간이 소요되기도 한다. 따라서 모델 위주의 방법을 사용하기 위해서는 효율적인 리소그래피 시스템 모델과 프로그래밍 기술이 필요하다.

### III. Monte-Carlo 방법을 사용한 근접 효과 보정

#### 1. 프로그래밍 기법 및 모델

본 연구에서는 수학적 모델을 사용하여 반복적인 계산을 통해 최적의 근사 패턴을 구할 수 있는 근접 효과 보정 프로그램(Optical Proximity Effect Reducing Algorithm, OPERA)을 개발하였다. OPERA

는 C++ 프로그래밍 언어로 프로그램 되었으며 GUI 환경을 위해서 wx Toolkit<sup>[10]</sup>을 사용하였다. OPERA는 윈도우 기반의 운영 체제에서 사용가능하며, 간단한 그래픽 편집기능과 대화 기능 등 그래픽 사용자 환경(GUI)을 갖고 있다. OPERA 프로그램 사용자는 그래픽 편집기를 사용하여 원하는 목표상을 편집하고 대화 상자를 이용하여 스테퍼 고유의 환경 변수를 입력하며 보정된 마스크 패턴 및 공간 이미지를 볼 수 있다. 그림 2에 OPERA 실행 화면 예를 보았다.

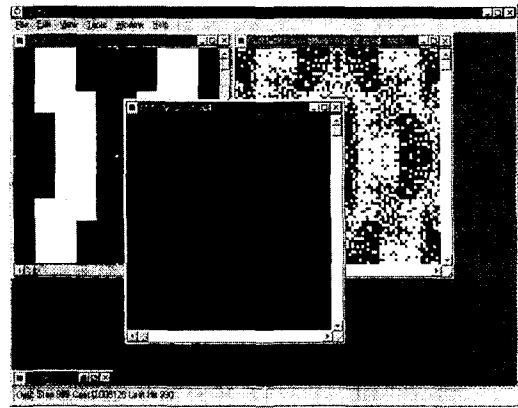


그림 2. OPERA 실행 화면

Fig. 2. Screen capture of OPERA execution.

이미 그림 3에 OPERA의 프로그램 모델을 보였다. OPERA 프로그램은 마스크 평면을 균일한 크기의 셀로 나눈 후 무작위적으로 셀을 선택하여 각 셀의 투과/불투과성을 바꾸어 웨이퍼 표면에서의 빛의 강도를 계산하여 현상 후의 패턴을 예측한다. 현재의 선택이 원하는 목표상에 근접하면 성공(hit)으로 인정하여 현재의 선택을 취하고 그 반대의 경우에는 실패(miss)이므로 원래의 모양으로 되돌린다. 이와 같은 과정을 지정된 횟수 또는 최대 실패 수만큼 반복한다. 이때, 입력 패턴에 대칭성이 있는 경우에는 입력 패턴의 대칭성에 따라 대칭 위치에 있는 여러 개의 셀을 한번에 택하여 셀의 투과/불투과 성질을 결정함으로써 마스크의 대칭성을 유지시킨다. OPERA의 알고리즘은 [11]에 보고된 것과 큰 차이가 없다. 그러나 웨이퍼에 맺힌 상과 목표 상과의 유사성을 판단할 수 있는 가격 함수(cost function)를 바꾸어 보정 효과를 높이고 마스크의 양산성을 향상시켰다. 즉, 공간 이미지와 목표 상과의 면적 차이 뿐만 아니라 패턴의 외곽 지역에서

공간 이미지 강도의 기울기를 같이 고려하도록 가격 함수를 정하여 보정된 패턴이 지나치게 분산하는 것을 방지하고 한 곳으로 모이게 할 수 있었다.

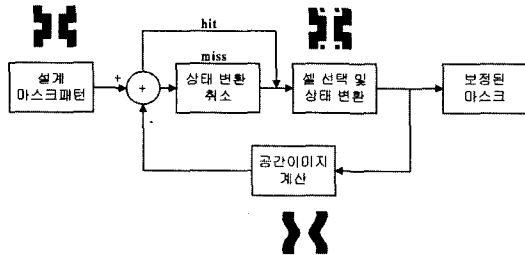


그림 3. OPERA의 프로그램 모델  
Fig. 3. OPERA program model

2. 리소그래피 시스템의 수학적 모델 및 연산 기법

OPERA와 같은 모델 위주의 OPC 프로그램에서는 공간 이미지 계산을 반복적으로 수행하므로 정확하면서도 계산 시간이 적게 소요되는 리소그래피 시뮬레이션이 필요하다. OPERA 프로그램에서는 공간 이미지 계산을 위하여 여타 프로그램에서와 마찬가지로 Hopkins 모델<sup>[12]</sup>을 사용하였다. 즉, 특정 위치에서의 공간 이미지 강도  $I(x,y)$ 는 마스크의 투과(clear)/불투과(opaque) 함수와 리소그래피 시스템의 Transmission Cross-Coefficient(TCC)의 컨볼루션(convolution)으로 구해진다는 것이다. 따라서, 마스크 투과 함수와 TCC를 푸리에 변환하여 곱을 구하고 이를 역 푸리에 변환하여 공간 이미지 강도를 구하는 방법을 취하였다.

OPERA에서는 마스크면을 작은 셀로 이루어지는 하나의 면으로 간주하였다. 이렇게 셀들의 집합으로 마스크 면을 재구성하면 마스크의 모양은 각 셀의 투과/불투과성에 의해 결정된다. 즉 마스크 투과 함수

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in \text{clear} \\ 0 & (x, y) \in \text{opaque} \end{cases} \quad (1)$$

와 같이 간단히 정의할 수 있다. 메모리 셀과 같이 반복적인 경우 이 함수의 푸리에 급수 표현이 가능하며 따라서 투과 함수는 푸리에 계수,  $A_{mn}$ 을 사용하여

$$f(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{mn} e^{i(\frac{2\pi}{p_x} mx + \frac{2\pi}{p_y} ny)} \quad (2)$$

으로 표현할 수 있다. 이미지 이론에 의하면 푸리에 계수들이 모두 사용되지는 않으며 이 중에서 낮은 차

수의 공간 주파수에 해당되는 몇 개의 계수만이 적용되며 그 개수는 조명의 종류와 크기에 따라 결정된다. OPERA에서는 초기에 조명의 종류가 결정되면 이에 따라 사용할 푸리에 계수의 개수를 결정하게 된다. 아래의 간략한 급수 표현은 결정된 푸리에 계수의 개수 범위를 나타내고 있다.

마스크 모양에 의한 푸리에 계수들이 주어지면 이미지 이론에 의해 이미지 평면에서의 한 점  $(x, y)$ 에서의 강도는

$$I(x, y) = \sum_{m, n, m', n'} A_{mn}^* A_{m'n'} T_{mm'n'} e^{i(\frac{2\pi}{p_x} (m-m')x + \frac{2\pi}{p_y} (n-n')y)} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이 식은 크게 세 부분으로 나뉘어지는데 첫 번째는 마스크의 모양에 의해 결정되는 계수  $A_{mn}$ 이며 두 번째는 마스크의 계수나 좌표  $(x,y)$ 에 의존하지 않는 TCC 행렬  $T_{mm'n'}$ 이고 마지막으로 특정 위치  $(x, y)$ 가 주어져야 계산할 수 있는 지수함수 값이다. 이러한 구분을 함으로써 광 강도 계산을 효율적이고 빠르게 할 수 있다. 즉 TCC 행렬  $T_{mm'n'}$ 는 조명 방식에만 의존하므로 조명 방식이 바뀌지 않는 한 다시 계산할 필요가 없다. 마찬가지로 조명과 마스크의 모양이 고정되어 있는 상황에서 이미지의 강도를 계산할 때에는 행렬  $T_{mm'n'}$ 와 푸리에 계수  $A_{mn}$ 이 곱해져 있는 값, 즉 각 지수함수의 계수를 미리 계산해 둬으로써 강도의 계산은 단순한 덧셈 연산으로 귀착시킬 수 있다. 따라서 이미지 강도의 계산을 어떠한 근사적 계산 없이도 빠르게 수행해낼 수 있다. 즉 이와 같이 미리 계산하여 저장한 지수함수의 계수를  $B$ 라고 하면 이미지의 강도를 나타내는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$I(x, y) = \sum_{k,l} B_{kl} e^{i(\frac{2\pi}{p_x} kx + \frac{2\pi}{p_y} ly)} \quad (4)$$

계수  $B_{kl}$ 은 계수  $A_{mn}$ 으로부터 계산되는 복소수이다. 여기에서 더 나아가서 위 식에 나타나는 각 양은 복소수이므로 실수로 표현하면 삼각함수의 합으로 표현된다.

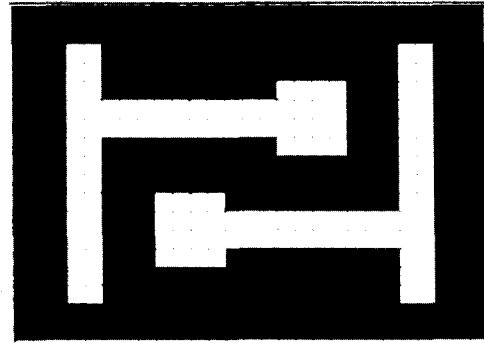
이상과 같이 TCC와 마스크 투과 함수의 푸리에 계수를 미리 계산하여 보관하고 변화된 부분만 계산하는 방법을 취하여 연산 속도를 향상시킬 수 있었다. 또한 각 위치에 해당하는 삼각함수의 값을 미리 계산하여

행렬에 보관하는 방법을 취함으로써 짧은 시간에 반복 연산이 가능하도록 하였다.

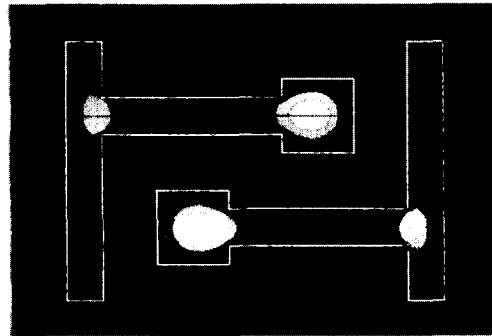
며 선의 두께와 간격 등 중요한 CD를 정확하게 재현하고 있다. 또한 공간 이미지의 강도와 기울기도 증가하여 공정 여유도가 크게 개선되었음을 알 수 있다.

#### IV. OPERA 수행 결과 예

OPERA를 실제 마스크 패턴에 적용하였다. 예제는 DRAM의 기본 셀 비트선(bit-line) 패턴과 SRAM 폴리(poly) 패턴의 일부 두 가지 경우이다. 그림 4(a)는 일반적으로 사용되는 비트선(bit line)의 마스크 패턴이며 그림 4(b)에는 웨이퍼에 투사된 공간 이미지를 보였다. 조명계로는 사극 조명(quadrupole illumination)을 사용하였다. 공간 이미지의 굴곡이 완만해졌으며 이에 따라 선의 두께와 간격 등 CD가 매우 심하게 왜곡되었음을 알 수 있다. 또한 공간 이미지의 강도와 기울기도 낮아 공정 여유도를 유지하기 힘들다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

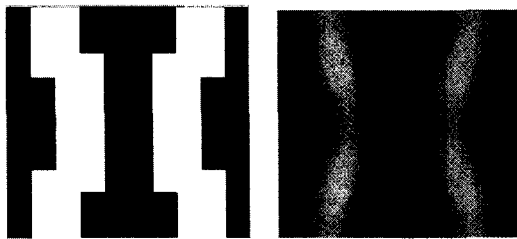
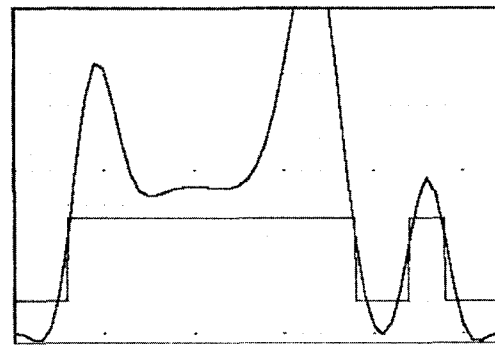


그림 4. 최적화 전의 비트선 모양  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상  
Fig. 4. Bit Line Pattern-Before Optimization.  
(a) Mask Pattern (b) Projected Image



(c)

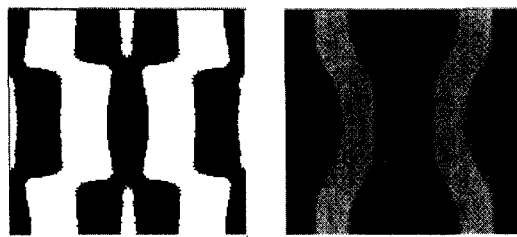


그림 5. 최적화된 비트선 모양  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상  
Fig. 5. Optimized Bit Line Pattern.  
(a) Mask Pattern (b) Projected Image

그림 6. 최적화 전의 SRAM Poly Pattern  
(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상 (c) 공간 이미지 단면도

Fig. 6. SRAM Poly Pattern-Before Optimization.  
(a) Mask Pattern (b) Projected Image (c) Crosssectional View of Image

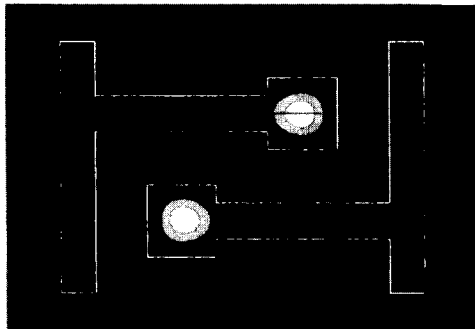
그림 5에는 OPERA를 사용하여 근접 효과를 보정한 마스크의 모양과 그로 인한 공간 이미지의 모양을 보였다. 이 경우 보정된 마스크가 웨이퍼 위에서는 원래의 목적했던 모양에 가까운 상을 맺히게 하고 있으

그림 6은 SRAM의 폴리 패턴의 일부에 대해 적용한 예이다. 조명계로는 기존의 (conventional) 노광장

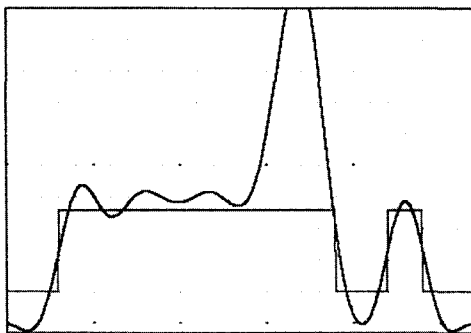
치를 사용하였다. 그림 6(b)의 공간 이미지는 패턴의 왜곡이 심각하며 밀집 패턴과 고립 패턴의 차이가 매우 크다. 따라서 밀집한 곳에서는 패턴이 굵게 나타나나 고립된 패턴은 폴리 선의 끝이 해상되지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 6(c)에는 그림 6(b) 점선에서의 공간 이미지의 단면을 원하는 마스크 모양에 중첩하여 보였다. 공간 이미지가 목표 위치에서 벗어난 것을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 7. 최적화된 SRAM Poly Pattern(a) 마스크 모양 (b) 웨이퍼에 투사된 상 (c) 공간 이미지 단면도  
 Fig. 7. SRAM Poly Pattern-After Optimization.  
 (a) Mask Pattern (b) Projected Image (c) Crosssectional View of Image

그림 7에는 보정된 SRAM poly 패턴과 공간 이미지를 보였다. 보정된 패턴에서는 규칙 위주의 방법에서 사용되는 모서리 보조 장식 및 감축과 보조 패턴 등의 효과를 낼 수 있도록 패턴의 모양이 변형되었다. DRAM 비트선의 경우와 마찬가지로 보정된 공간 이미지는 원하는 이미지에 가까워졌으며 강도와 기울기도 균일해졌음을 알 수 있다. 이에 따라 전체 폴리 선이 정확하게 나타났다. 또한, 그림 7(c)에 보인 공간 이미지의 단면도는 그림 6(c)에 비해 목표점을 정확하게 재현하고 있다.

### V. 결 론

기존 OPERA 프로그램 [12]에서는 보정된 마스크 패턴이 지나치게 복잡하여 마스크 제작비가 크게 증가하므로 실제 문제에 적용하기에는 현실성이 부족하다는 지적이 있었다. 새로운 OPERA 프로그램은 광리소그래피에서 필연적으로 발생하는 상의 왜곡 현상을 보정할 뿐 아니라 문제되었던 마스크의 생산성도 크게 개선되었다. 새로운 프로그램의 또 다른 장점은 공간 이미지의 강도와 기울기가 개선되어 보정 전에 비해 공정 여유도가 증가하고 있다는 것이다.

현재의 프로그램은 메모리 핵심부와 같이 반복되는 패턴이 있는 곳에 적용가능하나 앞으로 시스템 IC와 같이 반복 패턴이 없는 곳에서도 적용 가능하도록 할 계획이다. 시스템 IC의 전 칩에 대한 보정을 하기 위해서는 지금과 같은 무작위 방법으로는 지나치게 시간이 많이 걸리므로 합리적인 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 보이며 이에 대한 연구가 진행 중이다. 또한 현재는 PSM [1]에 대한 고려가 되어 있지 않으나 향후 그 중요성이 증대할 것을 고려하여 이에 대한 대책도 수립 중이다. OPERA 프로그램은 Windows 95 및 Windows NT 하에서 동작되고 있으나 wx Toolkit가 가진 Windows 환경과 X-window 환경의 호환성을 이용하여 Unix와 X-window를 갖춘 워크스테이션으로 이식할 예정이다.

### 참 고 문 헌

[1] 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, Dec. 1982.
- [2] T. A. Brunner, "Rim phase-shift mask combined with off-axis illumination", *Proc. SPIE*, 1993.
- [3] D. M. Newmark, J. Garafalo, and S. Vaidya, "Aerial Image based design of rim phase-shift masks with annular illumination", *Proceedings of SPIE*, 1993.
- [4] 오용호, 이재철, 이충훈, "Giga-Bit DRAM 시대의 리소그래피 기술", *원광대학교 기초과학연구지*, vol. 14, pp. 51-57, 1995
- [5] J. F. Chen, T. Laidig, K. E. Wampler, and R. Caldwell, "Practical optical proximity correction for full-chip implementation", *SPIE Microlithography Symposium*, 1997.
- [6] O. W. Otto and R. C. Henderson, "Integrating proximity effects corrections with photomask data preparation", *SPIE Microlithography Symposium*, 1995.
- [7] M. L. Rieger and J. P. Stirnman, "Using behavior modelling for proximity correction", *SPIE Microlithography Symposium*, 1994.
- [8] Y. Liu, A. Zakhor, and M. A. Zuniga, "Computer-aided phase shift mask design with reduced complexity", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 9, pp. 170-181, 1996.
- [9] N. Cobb, A. Zakhor, and E. Miloslavsky, "Mathematical and CAD framework for proximity correction", *SPIE Microlithography Symposium*, 1996.
- [10] J. Smart, *Reference Manual for wx Windows 1.67: a portable C++ GUI toolkit*, University of Edinburgh 1997.
- [11] 이재철, 오용호, 임성우, "광리소그래피에서 최적 모양의 패턴 구현을 위한 포토마스크 역설계", *전자공학회논문지-C*, vol. 34, pp. 1032-1037, 1997
- [12] H. H. Hopkins, "On the diffraction theory of optical images", *Proc. Royal Soc. Series A*, vol. 217, pp. 408-432, 1953.

---

 저 자 소 개
 

---

李在哲(正會員) 第34卷 D編 第12號 參照  
 현재 원광대학교 반도체학과 조교수

吳用璵(正會員) 第34卷 D編 第12號 參照  
 현재 원광대 반도체학과 조교수

林成禹(正會員) 第34卷 D編 第12號 參照  
 현재 원광대학교 물리과 부교수