

0.12 μm 설계규칙을 갖는 DRAM 셀 주요 레이어의 OPC 및 PSM

Study the Feasibility of Optical Lithography for Critical Layers of 0.12 μm DRAM

박기천, 오용호, 임성우, 고춘수, 이재철

(Ki-Chon Park, Yong-Ho Oh, Sungwoo Lim, Chun-Soo Go, Jai-Cheol Lee)

Abstract

We studied the feasibility of optical lithography for the critical layers of 0.12 μm DRAM assuming ArF excimer laser as a light source. To enhance the fidelity of aerial image and process margin, Phase shift mask (PSM) patterns as well as binary mask patterns are corrected with in-house developed Optical Proximity Correction (OPC) software.

As the result, we found that the aerial image of critical layers of DRAM cell with 0.12 μm design rule could not be reproduced with binary masks. But if we use PSM or optical proximity corrected PSM, the fidelity of aerial image, resolution and process margin are so much enhanced that they could be processed with optical lithography.

Key Words : optical lithography, OPC, PSM, DRAM

1. 서론

반도체 칩 내의 집적도가 급격하게 증가함에 따라 반도체 소자를 제작하는데 필요한 최소 선폭도 아주 작아지고 있다. 1Giga-bit DRAM을 제작하기 위해서는 0.18 μm , 4Giga-bit DRAM을 제작하기 위해서는 0.15 μm 이하의 최소 선폭을 필요로 하고 있다. 그러나 현재 광 리소그래피 공정을 위한 광원인 KrF와 ArF 엑시머 레이저의 분해능은 각각 0.25 μm , 0.20 μm 정도에 불과하므로 투영광학계의 저대역 필터링 특성으로 인한 패턴의 왜곡현상이 나타나게 되며 이와 같은 광 근접효과(Optical Proximity Effect, OPE)는 패턴이 작아질수록 더욱 심각해진다.

광 리소그래피에서는 마스크의 패턴을 통과한 빛이 광학 렌즈를 통하여 웨이퍼에 투사되는 노광 장치를 사용하고 있다. 이 때 광학계가 마스크 패턴의 공간 주파수(spatial frequency) 표현에 대해서 저대

역 필터(low-pass filter)로 작용하기 때문에 높은 주파수가 필연적으로 손실되므로 웨이퍼에 맺히는 상은 원하는 모양에서 왜곡된 형태가 될 수밖에 없다. 마스크 패턴의 크기나 주기가 큰 경우에는 기본 공간 주파수가 낮으므로 비교적 많은 차수의 주파수까지 투과가 가능하여 원래의 패턴과 유사한 상이 맺히게 된다. 그러나 패턴의 크기나 주기가 작아지면 공간 주파수가 높아지므로 투과되는 주파수의 개수가 감소하여 왜곡은 더욱 심해지게 된다. 최근 이러한 OPE를 마스크 패턴의 고의적 변형을 통한 보정 방법인 광 근접효과 보정(Optical Proximity Correction, OPC)을 적용하여 상의 왜곡을 보상함으로써 해상도 및 공정 여유도를 향상시키는 연구들이 진행되고 있다.

본 논문에서는 몬테-칼로 기법을 적용하여 제작된 OPC 프로그램[1-3]을 이용하여 파장이 0.193nm인 ArF 엑시머 레이저 광원에서 0.12 μm 의 설계규칙을 갖는 DRAM 셀의 주요 레이어에 대해 이진 마스크, 위상 변위 마스크(Phase Shift Mask, PSM)[4-5]에 OPC를 적용함으로써 광 리소그래피 공정의 가능성 여부를 분석하였다.

원광대학교 물리 반도체학부

(전북 익산시 신용동 원광대학교,

Fax: 063-854-2116

E-mail : sky73@shinbiro.com)

2000년 10월 9일 접수, 2000년 12월 29일 심사완료

2. OPC 프로그램

OPC 프로그램은 접근 방법에 따라 크게 두 가지로 나누어진다. 일반적인 리소그래피 공정 결과로부터 도출한 특정한 몇 개의 규칙을 사용하여 레이아웃 데이터를 처리하는 규칙위주의 방법(rule-based method)[6]과 리소그래피 시스템의 수학적 모델을 사용하여 OPE를 보정하는 모델 위주의 방법(model-based method)[7-9]이 있다. 규칙 위주의 방법은 공간 이미지에 대한 반복 계산 과정이 없으므로 대형 레이아웃 데이터를 빠른 시간 내에 처리할 수 있지만 최적의 레이아웃 데이터를 얻기 힘들다. 반면 모델 위주의 방법은 공간 이미지 계산을 반복적으로 수행하므로 시간이 많이 소요되나 패턴의 모양에 관계없이 최적의 결과를 제공한다.

본 연구에서 사용한 프로그램인 OPERA (Optical Proximity Effect Reducing Algorithm)는 몬테-칼로 기법을 적용한 모델 위주의 방법으로서 [그림 1]에 보인 알고리즘을 기반으로 하고 있다. 설계된 마스크 패턴 모양을 웨이퍼 면에서의 목표 이미지로 사용하여 여러 개로 나눈 마스크의 픽셀을 무작위로 추출하여 픽셀 단위로 마스크 모양을 바꾸어가며 웨이퍼 면에서의 빛의 강도를 계산한 후 목표 이미지와 비교하여 가장 적합한 마스크 설계 변수를 찾는 방법을 적용하고 있다. 최적화 된 설계 변수를

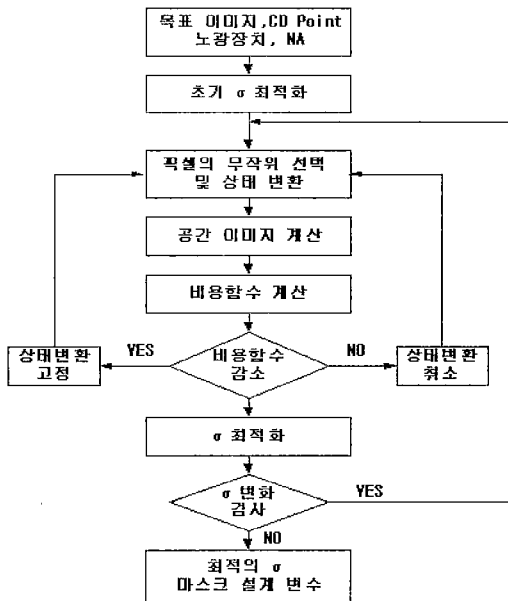


그림 1 OPERA 알고리즘
Fig. 1 OPERA algorithm

찾기 위해 비용함수를 목표 이미지와 계산된 이미지의 강도차이로 정의하였고 이를 최소화하는 방법을 적용하고 있다.

또한 OPERA는 레이아웃 패턴의 CD(critical dimension) $\pm 10\%$ 범위 내에서 노광 여유도를 계산하여 그 값이 가장 클 때의 결맞음 인수(coherence factor, σ)를 최적의 조명변수로 설정하고 있다. 노광 여유도의 계산 방법은 CD $\pm 10\%$ 지점에서의 광강도의 로그 경사도를 계산하여 CD에서의 값에 대한 비율로 계산하였다.

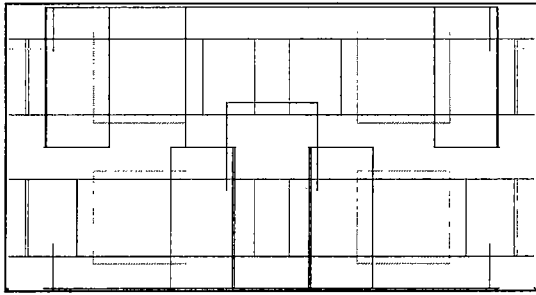
3. DRAM 셀의 주요 레이어의 광 리소그래피 가능성 분석

0.12 μm 의 최소 선폭을 갖는 DRAM 셀의 주요 레이어인 워드선(word line), 비트선(bit line), 저장 캐패시터(storage capacitor), 활성층(active), 활성층 콘택트 홀(active contact hole), 비트선 콘택트 홀(bit line contact hole)의 광 리소그래피 공정 가능 여부를 분석하였으며 분석의 기본 전략은 다음과 같다.

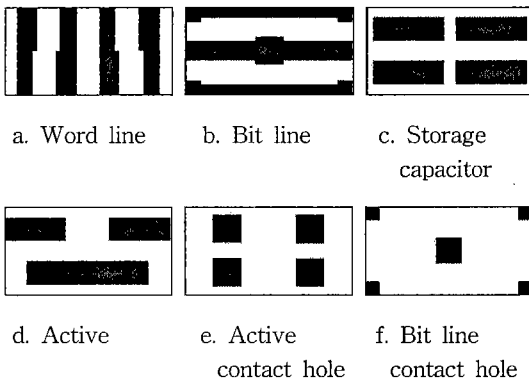
먼저 일반적인 이진 마스크에 대하여 광 리소그래피 공정 가능 여부를 분석하여 공정이 어렵다고 판단된 경우 OPC를 적용하였다. 그래도 공정이 어렵다고 판단되는 경우에는 해상력을 높이기 위한 마스크 변형 방법인 위상 변위 마스크(Phase Shift Mask, PSM)를 적용하였다. 이 때 패턴 사이의 간격이 패턴의 선폭 정도인 반복패턴에는 반복패턴에 적용할 수 있도록 제안된 레빈슨 형 PSM(Levenson type PSM, LPSM)를 적용하였고 패턴 사이의 간격이 패턴의 선폭 보다 큰 패턴구조에는 고립패턴에 적용할 수 있도록 제안된 투과율을 줄인 PSM(attenuated PSM, APSM)을 적용하였다. 마지막으로 LPSM, APSM만으로도 광 리소그래피 공정이 어렵다고 판단되는 경우에는 각각에 OPC를 적용하였다.

[그림 2] (a)는 시뮬레이션에 사용된 0.12 μm 의 최소 선폭을 갖는 DRAM 셀의 레이아웃으로서 기본셀의 크기는 $1.2 \times 0.66 \mu\text{m}$ 이다. [그림 2] (b)는 주요 레이어들을 기본 셀로부터 추출한 것이다.

시뮬레이션에 적용한 노광 장치로는 광원이 ArF 엑시머 레이저(193nm)이며 투영광학계의 개구수(Numerical Aperture, NA)는 0.5로 가정하였다. σ 는 OPERA를 이용하여 최적화한 후 시뮬레이션을 하였으며 PSM 적용 시에는 σ 가 작을수록 리소그래피 성능이 좋아짐은 잘 알려져 있으나 실제 광 리소그래피 공정에서의 생산성을 고려하여 0.3으로 고정하



(a) 중첩된 패턴 모양
(a) Composite layout pattern



a. Word line b. Bit line c. Storage capacitor
d. Active e. Active contact hole f. Bit line contact hole

(b) 각 레이어의 패턴 모양
(b) Critical layer patterns

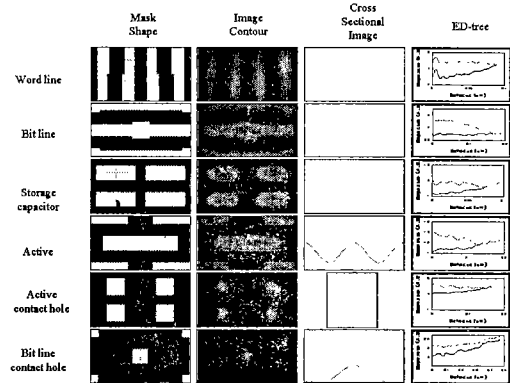
그림 2 사용된 DRAM 셀 레이아웃
Fig. 2 DRAM cell layout used in this study

였다.

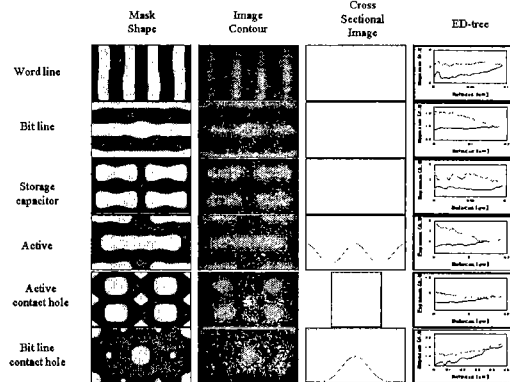
공정 여유도 분석을 위한 ED-tree 계산에서 CD 오차는 $\pm 10\%$ 까지로 허용하였으며 공정의 가능 여부는 노광 여유도(exposure latitude)가 $\pm 5\%$ 이상에서 초점심도(Depth Of Focus, DOF)가 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 이상이 되는 것으로 설정하였다. 최소 초점심도 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 는 기관의 단차, 웨이퍼의 편평도, 렌즈의 상면만곡(field curvature)에 의한 초점 오차 및 자동초점 장치의 오차 등을 고려하여 계산된 수치이다.

[그림 3]은 OPERA를 사용하여 $0.12\mu\text{m}$ 의 최소 선폭을 갖는 DRAM 셀 레이어의 주요 레이어에 이진 마스크를 사용하여 시뮬레이션한 결과이며 마스크의 모양, 공간 이미지, CD 위치에서의 공간 이미지 및 ED-tree를 나타내고 있다.

공간 이미지의 모양의 경우는 이진 마스크에 OPC를 적용하기 전에는 모두 심한 왜곡을 보이고 있으나 이진 마스크에 OPC를 적용한 후에는 공간 이미



(a) OPC 전 공간 이미지와 ED-tree
(a) Aerial image and ED-tree before OPC



(b) OPC 후 공간 이미지와 ED-tree
(b) Aerial image and ED-tree after OPC

그림 3 이진 마스크의 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Aerial image simulation result of binary mask

지 모양이 목표 이미지 모양에 근접했음을 볼 수 있다. [그림 3]의 ED-tree 결과를 [표 1]에 나타내었다.

[표 1]에서 보면 노광 여유도 $\pm 5\%$ 범위에서 초점심도가 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 에 미치지 못함을 볼 수 있다. 그러므로 이진 마스크만으로는 OPC를 적용한다 해도 광 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단된다.

따라서 각각의 레이어의 모양에 따라 LPSM이나 APSM을 적용하여 광 리소그래피 공정의 가능 여부를 판단하고자 하였다. [그림 4]는 패턴의 모양이 반복적인 레이어에 LPSM을 적용하여 시뮬레이션한 결과이다.

[그림 4]의 ED-tree의 결과를 [표 2]에 나타내었다. [표 2]에서 보면 비트선, 활성층, 활성층 콘택트

표 1 이진 마스크 OPC 전후의 각 레이어 별 초점심도

Table 1 Focus depth of critical layers before and after binary mask OPC

레이어	최소선폭 (μm)	σ	노광여유도 $\pm 5\%$ 범위에서 초점심도 (μm)	
			OPC 전	OPC 후
워드선	0.12	1	± 0.05	± 0.03
비트선	0.15	0.8	± 0.14	± 0.14
저장 캐패시터	0.12	1	± 0.06	± 0.09
활성층	0.15	1	± 0.11	± 0.11
활성층 콘택트 홀	0.12	1	± 0.06	± 0.06
비트선 콘택트 홀	0.18	0.4	± 0.23	± 0.23

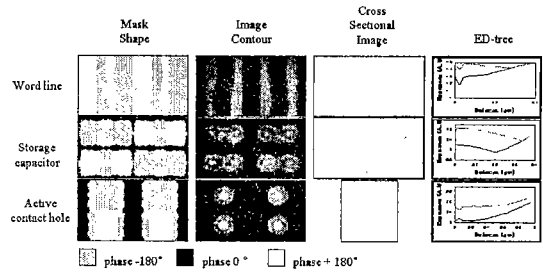


그림 5 LPSM에 OPC를 적용한 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Optical proximity corrected LPSM aerial image simulation result

[표 2]에서 보면 여전히 워드선은 초점심도가 $\pm 0.12\mu\text{m}$ 로 리소그래피 공정이 어려울 것으로 보인다. 저장 캐패시터의 경우 LPSM만을 적용한 경우 [그림 4]의 공간 이미지 모양에서 볼 수 있듯이 선 끝이 짧아지는 현상이 있었지만 LPSM에 OPC를 적용한 경우는 목표 이미지 모양에 근접해진 것을 볼 수 있다. 특히 저장 캐패시터는 패턴의 면적이 소자의 전기적 특성에 큰 영향을 주기 때문에 반드시 LPSM에 OPC를 적용해야 할 것으로 판단된다. 그러나 여전히 초점심도가 $\pm 0.3\mu\text{m}$ 로 리소그래피 공정이 어려울 것으로 보인다. [그림 5]의 활성층 콘택트 홀의 공간 이미지 모양에서 보면 LPSM만을 적용하였을 때보다 목표 이미지에 근접하였으며 초점심도도 $\pm 0.7\mu\text{m}$ 이므로 LPSM에 OPC를 적용하면 광 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단된다.

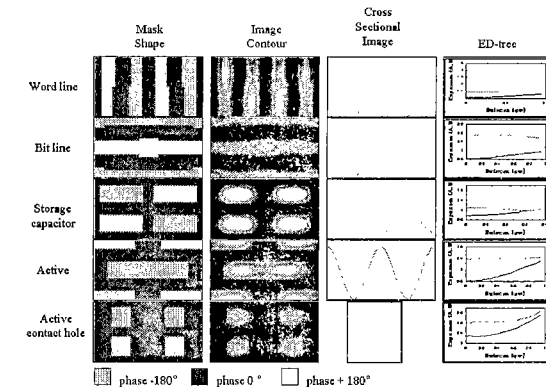


그림 4 LPSM 시뮬레이션 결과
Fig. 4 LPSM aerial image simulation result

홀 레이어의 초점심도가 $\pm 1\mu\text{m}$ 이상, $\pm 0.9\mu\text{m}$, $\pm 0.7\mu\text{m}$ 로 향상되었으나 워드선은 $0\mu\text{m}$, 저장 캐패시터는 $\pm 0.24\mu\text{m}$ 로 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단된다. 공간 이미지 모양 측면에서 보면 저장 캐패시터와 활성층 콘택트 홀의 경우 목표 이미지와 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 비트선과 활성층은 LPSM만을 적용하여도 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단되며 워드선, 저장 캐패시터, 활성층 콘택트 홀 레이어는 PSM 만으로는 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단되어 LPSM에 OPC를 적용하였다. [그림 5]는 이 레이어들에 LPSM과 OPC를 적용하여 시뮬레이션한 결과이다.

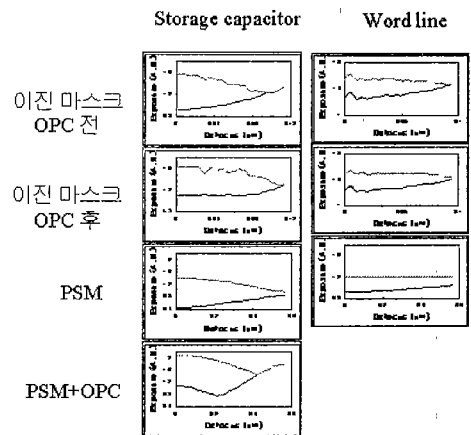


그림 6 CD 오차를 $\pm 15\%$ 까지 허용한 워드선과 저장 캐패시터의 ED-tree
Fig. 6 ED-tree of word line and storage capacitor with $\pm 15\%$ CD tolerance

워드선과 저장 캐패시터는 LPSM에 OPC를 적용하여도 광 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단되기 때문에 패턴의 CD 오차를 $\pm 15\%$ 까지로 허용하고 ED-tree를 다시 계산하였다. [그림 6]의 ED-tree 결과를 [표 2]에 나타내었으며 CD 오차가 $\pm 15\%$ 인 경우 이진 마스크에서는 초점심도가 [표 2]와 같이 OPC 전, 후 모두 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이하로 여전히 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단된다. LPSM을 적용한 경우에는 워드선과 저장 캐패시터의 초점심도가 각각 $\pm 0.6\mu\text{m}$, $\pm 0.55\mu\text{m}$ 로 향상된 것을 볼 수 있다. 그러나 저장 캐패시터의 공간 이미지 모양은 여전히 선 끝이 짝아지는 현상이 일어나므로 LPSM에 OPC를 적용하면 초점심도가 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 이고 공간 이미지 모양이 목표 이미지 모양에 근접하므로 광 리소그래피 공정을 할 수 있을 것으로 보인다.

이와 같이 $0.12\mu\text{m}$ 의 최소 선폭을 갖는 워드선과 저장 캐패시터의 경우 CD 오차를 $\pm 15\%$ 까지 허용하고, 워드선 경우에는 LPSM, 저장 캐패시터의 경우에는 LPSM에 OPC를 적용하여야 광 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단된다.

[그림 7]은 패턴의 모양이 고립적인 비트선 콘택트 홀 레이어에 APSM의 투과계수를 변화 시키면서 각각에 OPC를 적용하여 시뮬레이션한 결과이다. [그림 3] (a)의 이진 마스크 경우와 비교하면 공간 이미지 모양이 목표 이미지 모양에 근접하고 있는 것을 볼 수 있다. [표 2]의 초점 심도를 보면 투과계수 0.2에서는 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 이지만 그 외에는 모두 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 를 넘지 못하는 것을 볼 수 있다. 또한 [그림 7]의 마스크 모양에서 보면 투과계수 0.2가 마스크 제작 측면에

서도 가장 용이하므로 투과계수 0.2를 선택하여 OPC를 적용하면 광 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단된다.

표 2 PSM에 OPC 적용한 전후의 각 레이어 별 초점심도
Table 2 Focus depth of critical layers before and after PSM OPC

레이어	마스크 종류	σ	노광여유도 $\pm 5\%$ 범위에서 초점심도 (μm)		
			OPC 전	OPC 후	
			워드선	CD $\pm 10\%$	LPSM
CD $\pm 15\%$	이진 마스크	1		± 0.07	± 0.08
	LPSM	0.3	± 0.6	-	
비트선		LPSM	0.3	± 1	-
저장 캐패시터	CD $\pm 10\%$	LPSM	0.3	± 0.24	± 0.3
	CD $\pm 15\%$	이진 마스크	1	± 0.08	± 0.1
		LPSM	0.3	± 0.55	± 0.4
활성층		LPSM	0.3	± 0.9	-
활성층 콘택트 홀		LPSM	0.3	± 0.7	± 0.7
비트선 콘택트 홀 (APSM)		t=0.2	0.3	-	± 0.5
		t=0.4	0.3	-	± 0.37
		t=0.6	0.3	-	± 0.37
		t=0.8	0.3	-	± 0.35
		t=1.0	0.3	-	± 0.35

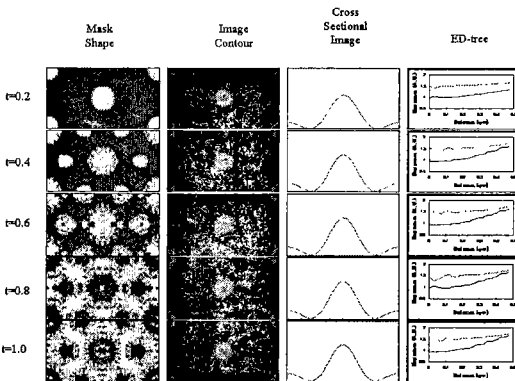


그림 7 비트선 콘택트 홀에 대한 APSM에 OPC를 적용한 시뮬레이션 결과

Fig. 7 Simulation result of optical proximity correction (OPC) of bit line contact hole

4. 결론

$0.12\mu\text{m}$ 설계규칙의 DRAM 셀 레이어에 대하여 광 리소그래피 공정의 가능성 여부를 시뮬레이션을 통하여 분석해 보았다.

먼저 이진 마스크의 경우 공간 이미지 모양, 초점심도가 OPC를 적용하더라도 광 리소그래피 공정에서 요구하는 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 보다 작아 광 리소그래피 공정이 어려울 것으로 판단되었다.

이의 개선을 위해 반복적인 패턴인 워드선, 비트선, 활성층, 저장 캐패시터, 활성층 콘택트 홀 레이어에는 LPSM을 적용하였으며 고립 패턴에 가까운 비트선 콘택트 홀에서는 APSM에 OPC를 적용하였다. 비트선, 활성층의 경우 LPSM, 비트선 콘택트 홀의 경우 APSM의 투과계수 0.2에 OPC를 적용하면 초

점심도, 공간 이미지 모양이 크게 향상되어 광 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단되었으며 활성층 콘택트 홀 레이어의 경우 LPSM에 OPC를 적용하여야 공간 이미지 모양이 목표 이미지 모양에 근접하게 되어 리소그래피 공정이 가능 할 것으로 보였다. 워드선과 저장 캐패시터의 경우 LPSM에 OPC를 적용하여도 초점 심도가 $\pm 0.12\mu\text{m}$, $\pm 0.3\mu\text{m}$ 로 광 리소그래피 공정이 어려울 것으로 예상되므로 CD 오차를 $\pm 15\%$ 까지 허용하여 워드선 경우에는 LPSM, 저장 캐패시터의 경우에는 LPSM에 OPC를 적용하여야 광 리소그래피 공정이 가능할 것으로 판단되었다. 특히 저장 캐패시터는 패턴의 면적이 소자의 전기적 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 OPC를 사용하여 패턴의 모양을 보정하는 작업이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구에 사용한 DRAM cell layout을 지원해 주신 KAIST 유희준 교수님께 감사 드립니다. 또한 이 연구는 1999년 원광대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행하였으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

[1] Yong-Ho Oh, Jai-Cheol Lee and Sungwoo Lim, Resolution enhancement through a rule-free optical proximity correction in optical lithography, J. Korea Phys. Soc. Vol. 33, pp, S63-S66, 1998.

[2] 이재철, 오용호, 임성우, 광리소그래피에서 최적 모양의 패턴 구현을 위한 포토마스크 역설계, 전자공학회지-C, vol. 34, pp. 1032-1037, 1977.

[3] Jai-Cheol Lee, Yong-Ho Oh and Sungwoo Lim, Optimum photomask design for maximum fidelity and process margin with a Monte-Carlo method, Proc. Of 5th International Conference on VLSI and CAD, 1997.

[4] M.D. Ivenson, N. S. Viswanathan, and R. A. Simpson., Improving resolution in photolithography with a phase shift mask, IEEE Trans, vol ED-29, no 12, pp. 1828-1836, 1982

[5] Y. Iwabuchi et al., Practical attenuated Phase-shifting mask for KrF excimer laser lithography, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 32, pp.

5900-5902, 1993.

[6] O. Otto, J. Garofalo, K. Low, C. Yuan, R. Henderson, C. Pierrat, R. Kostelak, S. Vaidya and P. Vasudev, Automated optical proximity correction a rule-based approach, Proc. Of SPIE Microlithography Symposium. Vol. 2197, pp. 278-293. 1994.

[7] N Cobb and A.Zakhor, Large area phase-shift mask design, Proc. Of SPIE Microlithography Symposium, vol. 2197, pp. 348-360, 1994.

[8] N. Cobb and A. Zakhor, Fast, low-complexity mask design, Proc. Of SPIE Microlithography Symposium, vol. 2440, pp. 313-327, 1995.

[9] J. Striniman, M. Rieger and R. Gleason, Quantifying proximity and related effects in advanced wafer processes, Proc. Of SPIE Microlithography Symposium, vol. 2440, pp. 252-260, 1995