



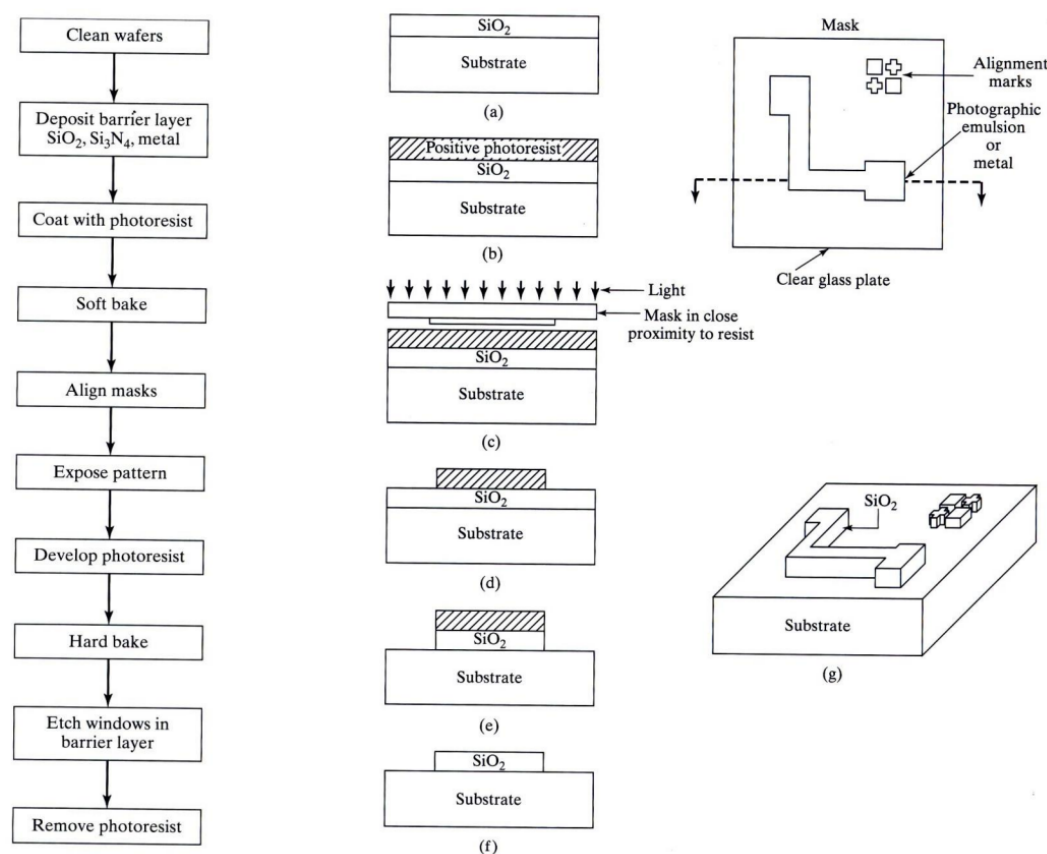
공정 3. Photolithography (1) : Microlithography

| | |
|------------|---|
| ➤ 관련 과목 | |
| ➤ 관련 시험/과제 | |
| ➤ 강의 일자 | |
| ☰ 상태 | 완강 완성 |
| 📎 강의자료 | |

Purpose

- Photolithography encompasses all the steps involved in transferring a pattern for a mask to the surface of the silicon wafer.
patterning 하는 기술이 매우 중요
- Ultra-clean conditions must be maintained during the lithography process; cleanrooms have evolved from the Class 10,000 to Class 1 for VLSI (ULSI) processing.
* Class: number of particle exceeding a size of $0.5\ \mu\text{m}$ per ft^3

General Step



[1]~[2] Wafer Cleaning & Barrier layer

Wafer Cleaning

- wafer 사용 전 chemically cleaning 필요. 표면에 있는 이물질 제거해야 이후 공정에 문제 생기지 않기 때문. (organic, ionic, and metallic impurities)
- 일반 물로 씻으면 short 날 수 있음. → Deionized (DI) water 사용
- DI water란?
 - highly purified and filtered
 - resistivity: $18\ \text{M-ohm-cm}$ @ 25°C (저항 매우 큼. 증류를 통해 이온 제거됨)

- no particles larger than 0.25 μm (증류를 통해 불순물 제거됨)
- 증류되지 않은 물에 포함된 이온과 불순물이 소자에 영향을 끼칠 수 있기 때문(방전 등).

Barrier Layering (절연막)

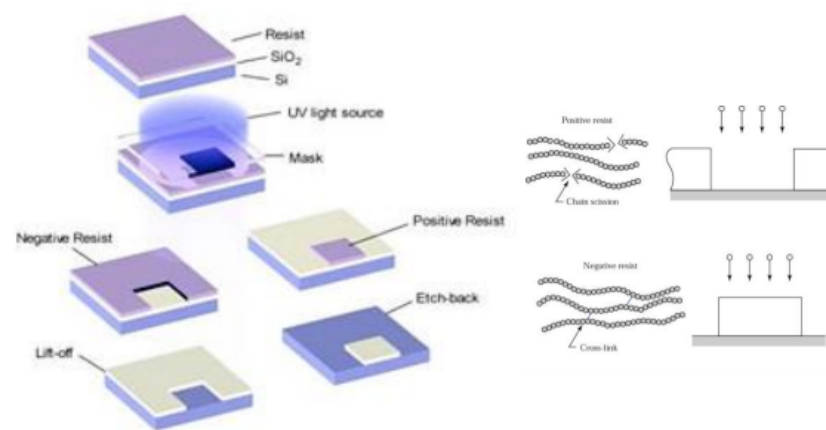
- SiO_2 , Si_3N_4 , Polysilicon, Metal 등
- deposit 어떻게 하는 지는 뒤에 배움

3/10 → 3/15

[3] PR Coating

Photoresist

- [조건1] light-sensitive 해야 함
- [조건2] substrate와 adhesion이 좋아야 함
- 보통 점도 있는 액체임
- positive와 negative가 있음.
 - positive(+) : mask로 막힌 부분이 남음. UV를 받은 부분의 positive PR은 고분자 결합이 끊어져서 chemical structure가 변함, developer에 의해 사라짐.
 - negative(-) : mask로 막힌 부분이 사라짐. UV를 받은 부분의 negative PR의 고분자들이 뭉침(crosslinked/polymerized), developer에 의해 사라지지 않음.
- *develop : developer라는 현상액을 이용하여 일정 부위의 PR을 제거하여 패턴을 형성하는 과정.



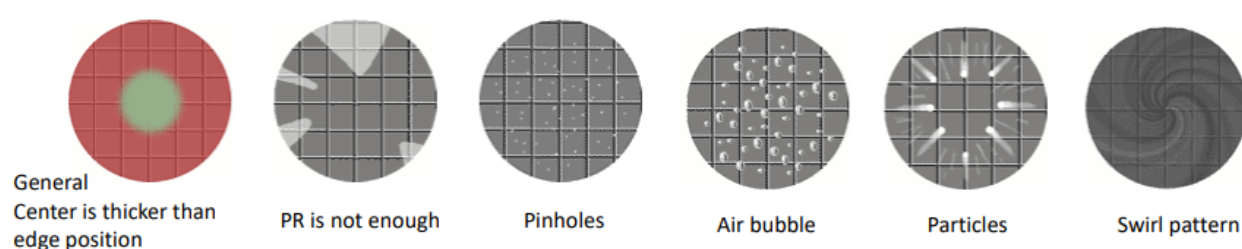
Spin Coating

- coating되는 두께는 viscosity(PR의 점도)와 spinning speed에 따라 달라짐.
→ 재료마다 recipe를 확보해야 함.

$$t = kp^2/w^{1/2}$$

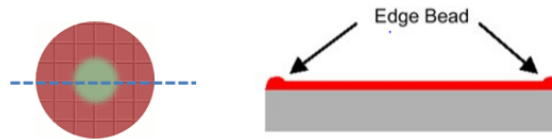
(t=thickness, k = spinner constant, p=resist solid contents(점도) in percent, w=spinner speed)

- spin coating 할 때 발생하는 case들
 - 1) 보통 edge보다 center가 두꺼움. 특히 속도가 느리면 이렇게 됨.
 - 2) PR 양이 부족할 경우 코팅이 덜 될 수 있음
 - 3) pinholes, air bubble : wafer에 구멍이 있거나 기포가 발생한 경우 매끈하게 코팅이 안 됨
 - 4) wafer 위에 particle이 있으면 particle 뒤쪽으로 coating이 안 됨(PR이 가로막혀서)
 - 5) swirl pattern : PR과 다른 물질이 반응하면 이렇게 됨



- 속도, 시간, PR 양 너무 과하지도 적지도 않게 잘 조절해야 함.
기포를 터트려주거나 다시 coating 해야할 수 있음.

- 방지하는 법 : [wafer cleaning](#) (cleaning이 중요한 이유 중 하나)
- **edge bead**



- 원심력에 의해 웨이퍼 가장자리의 PR이 뭉치는 현상
- 커피 방울 떨어지고 마르면 테두리만 두껍게 남는 모양 생각하면 됨 (residual ridge in resist at edge of wafer)
- nominal thickness보다 20~30배 더 두꺼워질 수도 있음.
- 표면에 mask를 부착하거나 contact 공정을 할 때 방해될 수 있으므로 edge bead removal 공정을 통해 없애주는 게 좋음. 연구실에서는 보통 생략하지만 정밀한 공정에서는 필요.

그 외 coating 방식

- Roll/Die coating : substrate의 크기가 큰 공정에 주로 사용함 (LCD, PDP 등, 디스플레이 공정)
- Spray coating

[4] Soft Bake

- 주 목적 : improve adhesion(하부 물질과 PR) & **remove solvent**
- PR이 액상으로 남아있는 상태에서는 다음 공정을 할 수 없음. 고체상태로 만들어줘야 함. solvent 날려보내면 끈적끈적 → 단단해짐
- soft bake를 덜 하면 chemical 구조가 불안한 상태, development rate 높음 (잘 벗겨진다,,?)
→ 다음 공정에 문제가 생김.
- 일반적으로 80~95도 hot plate에서 2분 또는 오븐에서 10~30분 (PR 종류 따라 다름)
— thermal conductivity, heat direction 고려하여 선정
- 생산라인에서는 microwave heating이나 IR lamp를 사용하기도 함
- 보통 PR은 soft bake 하면 두께가 25% 감소. 이거까지 고려해서 recipe 짜야 함

[5] Align & Mask

Mask Alignment

- one layer로 공정하면 필요 없는데 보통은 2개 이상의 layer 사용.
이전 layer와 다음 layer가 잘 align 되어야 결과물에 문제가 없음.
- mask에 align mark(alignment key)를 디자인해서 넣고 현미경으로 맞춤.
- align mark는 edge 쪽에 넣는 게 좋음, 보통은 양끝에 하나씩 넣어 2개 사용 :
1) wafer edge는 일반적으로 수율이 안 좋음. (wafer 들고 옮길 때 손상, edge bead 등 때문에).
버리는 공간을 더 효율적으로 이용하기 위해 mark를 넣자.
2) align 할 때 틀어진 각도가 center보다는 edge에서 더 잘 보임.
- 2nd layer의 key는 1st layer의 key보다 같거나 작아야 함. 그래야 덮어졌을 때 1st를 가리지 않으므로. (직접 해보면 됨)
- 어떤 align key를 사용하는 게 좋은지는 PR의 종류, bright/dark 영역 따라 다름.

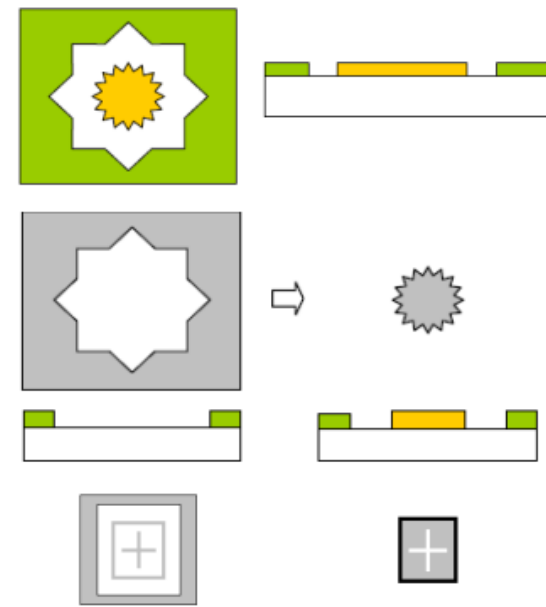
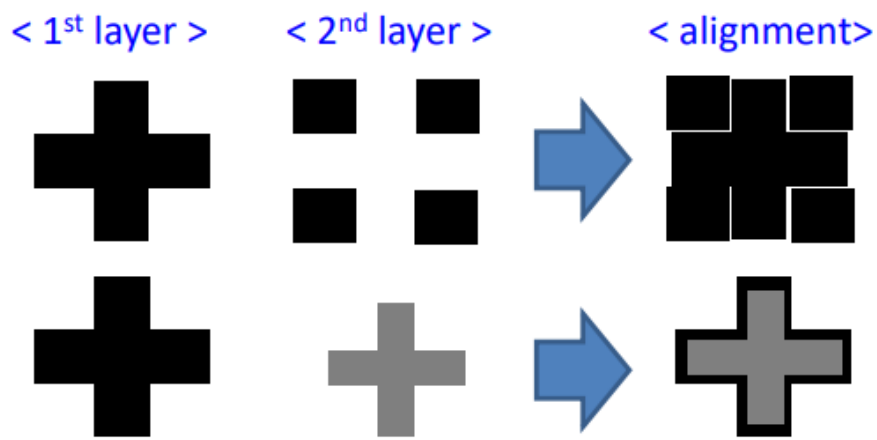
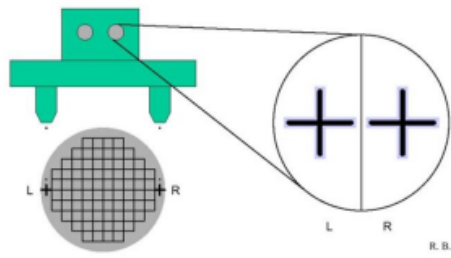
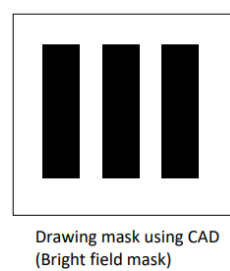
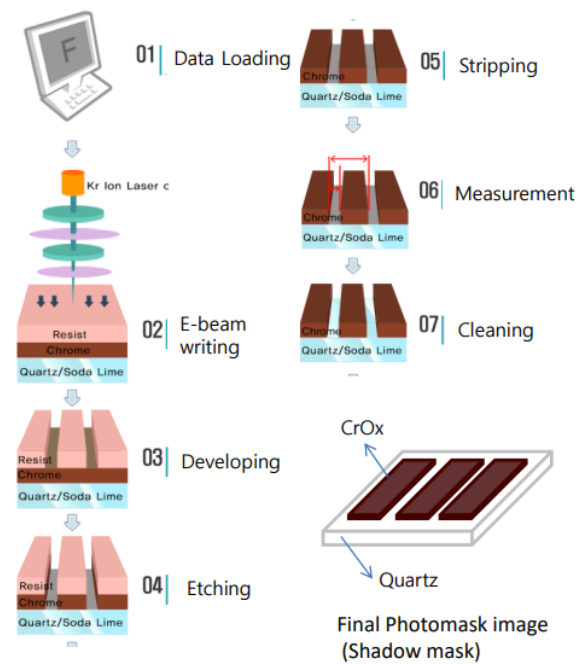


Photo mask

- 가리는 부분 < 안 가리는 부분
—> bright-field mask라고 함



- dark field에 chrome을 쓰는 이유 : 빛을 투과시키지 않고 흡수함. → 빛 차단을 잘 함.
- glass는 결정구조를 이루고 있어 빛이 잘 투과되는 quartz를 사용.



[6] Exposure

빛을 조사함 → 물질의 chemical structure를 변화시킴

Shadow printing

- mask와 pattern 크기 비율이 1:1

| | Contact printing | Proximity printing |
|----|--|--|
| 장점 | - 최소 pattern size : ~1um (작은 패터닝) - simple & easy | - no contamination - no damage |
| 단점 | - mask contamination (오염) - mask damage - edge beam 생기면 mask가 뜸 (—>PR coating 잘 해야 함) | - 최소 pattern size : 2~5um (약간 큼) - 정밀한 gap control이 필요 보통 gap : 50~100um인데 gap 사이로 빛이 일부 들어가서 pattern이 mask보다 커짐 |

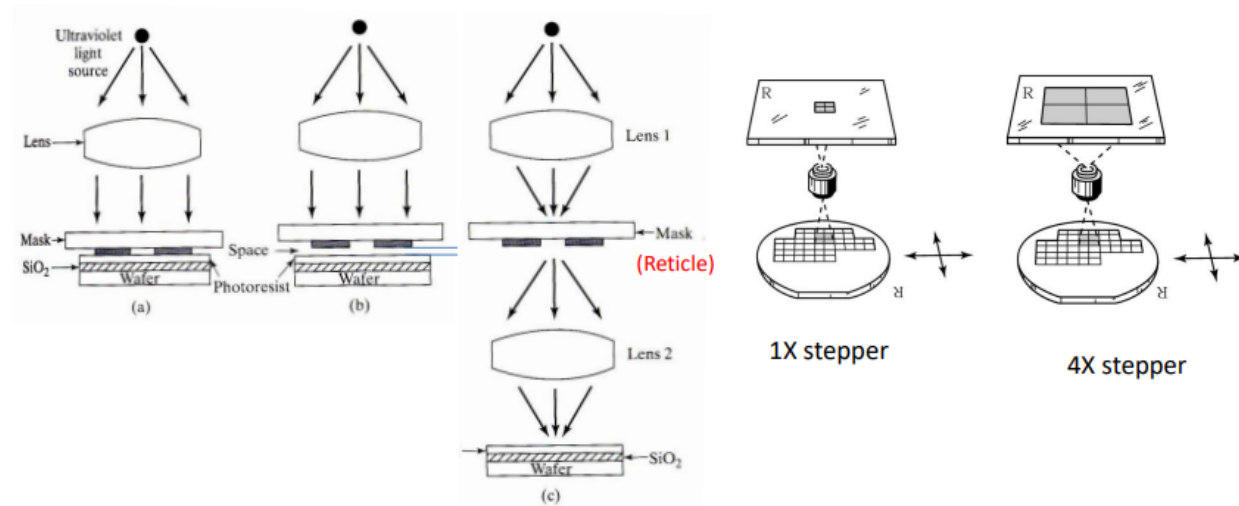
↓ 이렇게 pattern이 커지는 걸 보완하는 다른 방식

↓

Projection printing: Stepper

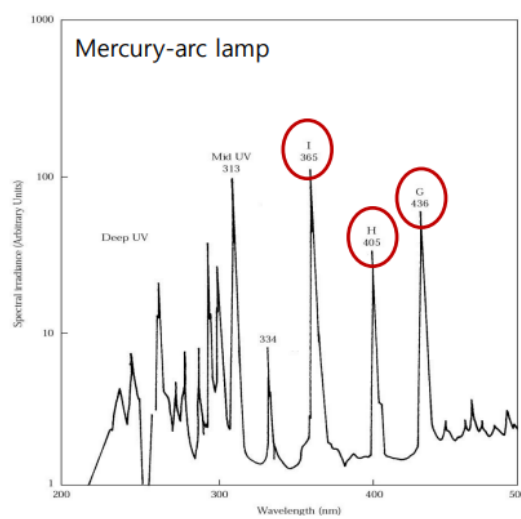
- 렌즈를 이용해서 mask 크기보다 작게 patterning 할 수 있음

- 장점 : 최소 pattern size : ~70nm (매우 작은 패턴닝)
no contamination
no damage
- 단점 : small exposure area → 여러 번에 걸쳐 exposure
→ time loss. 시간이 오래 걸림

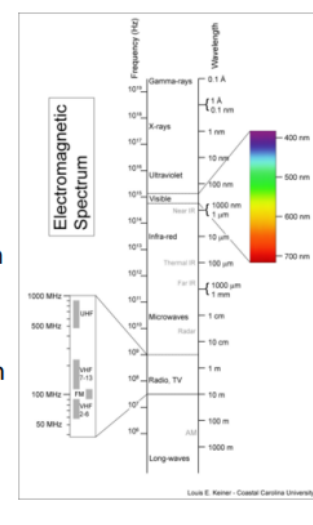


Exposure Source

- 광원의 파장을 줄이는 것은 어려운 일.
→ 기존 광원의 한계를 뛰어넘기 위해서는 새로운 exposure 기술이 필요함
- excimer laser 중에서는 보통 ArF (193nm) 사용함.



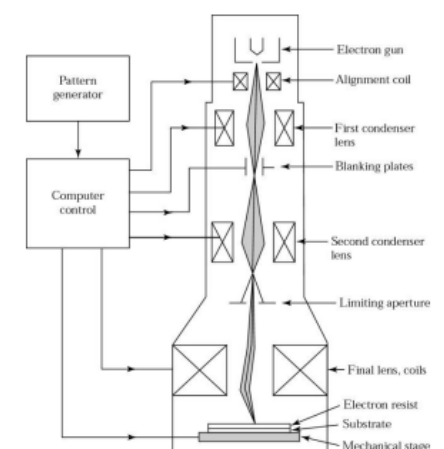
G-line stepper: 436nm
H-line stepper: 405nm
I-line stepper: 365nm
; 5x → 300nm
KrF excimer laser : 248nm
; 180nm
ArF excimer laser : 193nm
; 100nm
F₂ excimer laser : 157nm
; 70nm



New exposure technique

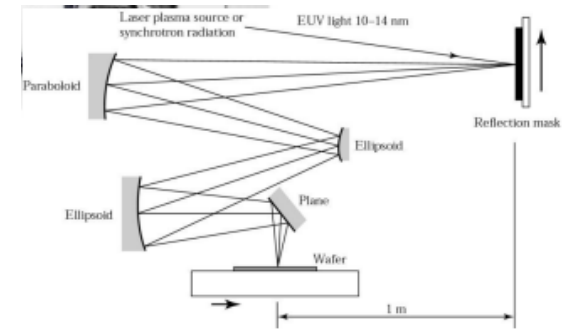
1) Electron beam (E-beam) lithography

- E-beam을 집중시키기 위해 condenser lense 사용
- beam size : 5nm~500nm
- 한계 : beam은 작는데 wafer는 큼.
→ **low throughput**. 너무 오래 걸림.
→ 연구용 소자 공정에는 괜찮겠지만, 대량으로는 힘들.



2) Extreme ultraviolet (EUV) lithography

- wavelength : 10~14nm
- 아주 작은 patterning에 유용함.
- 한계 : 사용하기 위해서는 vaccum state를 만들어야 함.

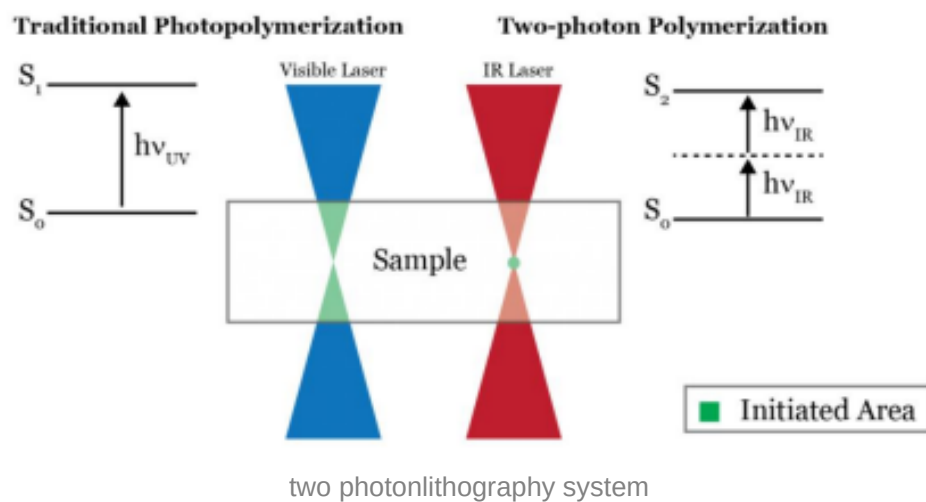


3) X-ray lithography

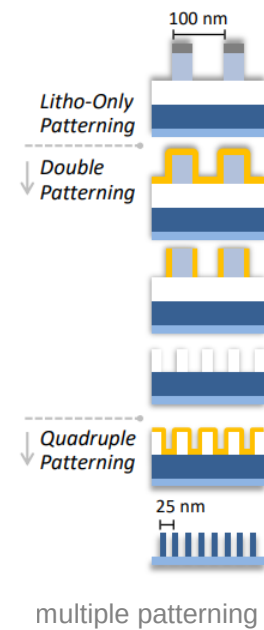
- 강한 에너지, 짧은 파장
- 아직 널리 적용하고 있지는 않음.

4) two-photon lithography system

- 원래 전자는 bandgap보다 큰 에너지가 조사되어야 state가 변할 수 있음
- 그러나 bandgap보다 낮은 에너지를 조사해도 2개가 만나 harmonic이 일어나면 state를 뛰어넘을 수 있음.
- 아주 짧은 시간에 광자 에너지가 집중돼야 가능
- 발생하는 영역이 작기 때문에 상업적으로는 X, 연구 쪽에 주로 사용



3/15 → 3/17



5) double patterning

- 넓은 wavelength의 광원으로 ~14nm 공정을 할 수 있었던 이유
- 과정 (위 그림 참고)
 - 1) 상대적으로 큰 pattern을 litho 공정으로 patterning
 - 2) 표면에 얇은 박막을 증착함
 - 3) anisotropic etching을 통해 벽면에만 박막을 남김
 - 4) 박막을 mask로 이용해 etching → pattern pitch size가 1/2배가 됨 (double patterning)
 - 5) 이 과정을 한 번 더 함 → pattern pitch size가 1/4가 됨 (quadruple patterning)
- 이것도 더 여러 번 하기엔 물리적 한계가 있음.
14nm → 10nm 이하로 줄이는 건 아예 파장을 바꾸는 게 현실적으로 유리함. → EUV 장비 사용

6) Laser Writer

- E-beam lithography의 low throughput을 극복하기 위한 기술

그 외 ArF의 한계를 극복한 공정 기술

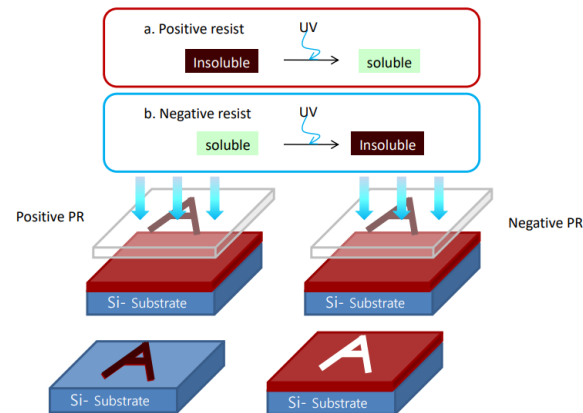
- phase shift masks (development에 자세히)
- optical-proximity correction(OPC) techniques

- double exposure

[7] Development

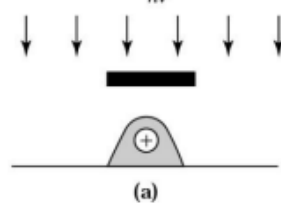
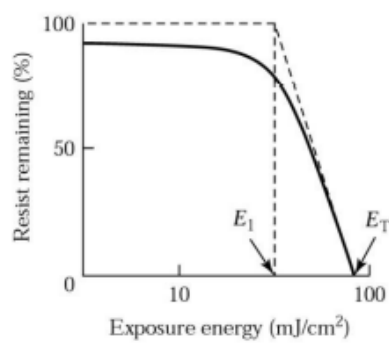
Photoresist & Development

- 같은 mask를 쓰더라도 positive PR / negative PR에 따라 결과가 달라짐



Contrast Ratio

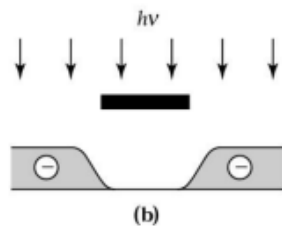
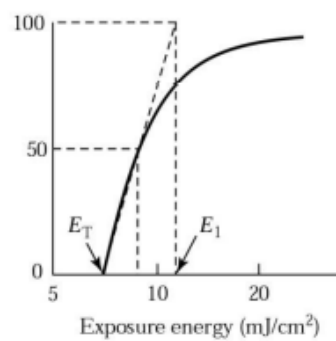
- mask로 가려진 부분이 수직으로 정확히 남으면 좋겠지만 실제로 그렇지 못함. 그림처럼 경사가 짐.
- contrast ration가 커야 sharp함 → 높이기 위한 노력이 필요
- 일반적으로 negative보다 positive가 큰데, 이론적인 것보다는 재료의 chemical한 특성 때문이라 어쩔 수 없음



$$\text{Positive PR} : \gamma \equiv \left[\ln \left(\frac{E_T}{E_1} \right) \right]^{-1}$$

E_T : threshold energy to resolve the resist completely

E_1 : tangent value at E_T to reach 100% resist thickness (그래프 점선 참고)



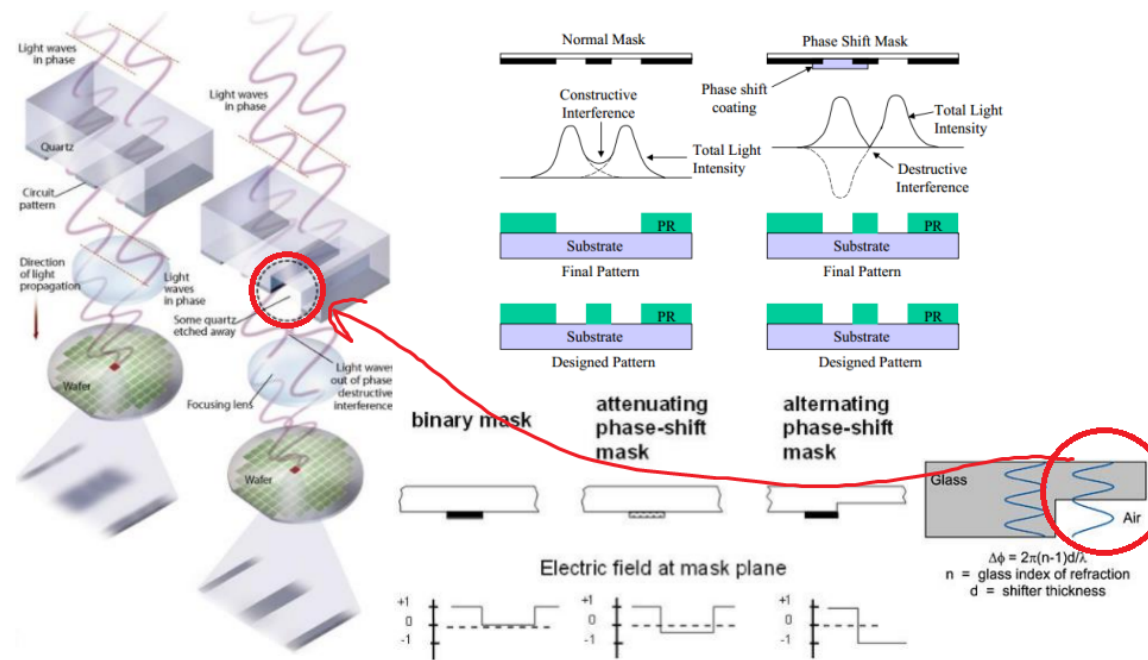
$$\text{Negative PR} : \gamma \equiv \left[\ln \left(\frac{E_1}{E_T} \right) \right]^{-1}$$

E_T : threshold energy to remain the resist

E_1 : tangent value at E_T to reach 100% resist thickness

Phase Shift Mask (PSM)

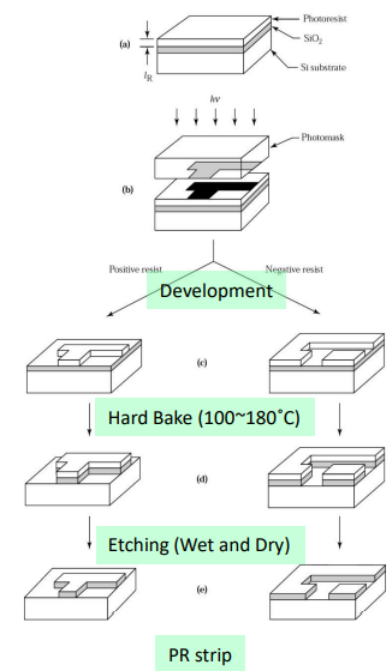
- 빛을 이용하기 때문에 pattern 간격이 줄어들면 diffraction(회절)과 interference(간섭) 발생 → pattern에서 mask가 안 되고 사라지는 부분 발생
- open된 부분에 phase shift를 하는 coating막을 추가함 → destructive interference(상쇄간섭) 발생시킴
- 원리 : 매질이 'dense한 물질 → air'로 바뀌면 wave의 phase가 바뀌는 현상 이용



[8]~[9] Hard bake & Removal

Hard bake

- 역할 : patterning된 PR이 아래쪽에 있는 SiO₂를 잘 mask하도록 stabilize, harden 해줌
- soft bake는 solvent만 제거한 거였고, hard bake는 solvent, developer를 제거할 뿐만 아니라 PR을 완전히 굳히기 때문에 온도가 더 높음
- soft bake와 마찬가지로 PR의 shrinkage 발생 (stress 유발, 두께 감소 → 잘 고려해서 recipe 짜기)
- 너무 오래 or 뜨겁게 bake하면 나중에 PR을 제거하기 어려워짐
→ 적절한 온도와 시간 필요



Lift-Off Technique

- 앞에서는 patterning할 target 깔기 → PR → patterning 순으로 진행 했는데, 이걸 PR → patterning → target 깔기 순으로 함
- 이 때 PR 위의 물질과 substrate 위의 물질이 완전히 분리되어 깔리도록 하는 게 lift-off
- PR의 step coverage가 나쁠수록 shadowing 등이 잘 돼서 lift-off 잘 됨 (뒤에 나옴) & PR을 역사다리꼴 모양으로 남겨서 경계면 딱 끊기게 할 수 있음
- positive pattern을 negative로 바꿀 수 있음 (bright → dark field)
- 장점 : etching 공정 생략하고 PR removing만 하면 됨
→ simple & easy
→ etching하기 힘들거나, etchant가 인체에 너무 해로운 경우 유용
- 단점 : film(target layer)의 두께가 PR의 두께보다 얇아야 함

PR Removal

- Chemical (PR stripper)
- Plasma (PR asher)

[참고]

- cleaning 할 때 acetone → metanol → IPA 순서
이유 : acetone이 organic, polymer 물질 녹임 → metanol이 acetone 녹임 → IPA가 metanol 녹임