

반도체공정개론

Homework #1

학번 201911117

이름 이나영

담당 교수 권혁준 교수님

담당 조교 이지은 조교님

반도체공정개론 Homework #1

201911117 이낙영

Problem Set #1

반도체 산업에서 로직 소자는 2010년에 32nm 노드에서 현재는 7nm 노드로 그 크기가 현저하게 줄어들었다. 하지만 14nm 등 10nm 범위의 초미세공정을 위한 노광(photolithography) 공정에는 아직도 193nm ArF Eximer laser 를 광원으로 사용하면서 매우 작은 패턴을 완성하고 있다.

a) (50 pts) Immersion 노광은 193 nm ArF laser 광원의 노광 한계를 극복하기 위해 많이 사용하고 있는 방법이다. 어떠한 원리로 노광 한계를 극복하는지 그 원리를 구체적으로 물리적 관계식을 활용하여 설명하시오.

immersion 노광은 렌즈와 웨이퍼 사이의 매질로 물을 사용하여 노광의 해상도를 높인다.

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} = k_1 \frac{\lambda}{n \sin \theta}$$

렌즈의 practical resolution은 위와 같은 물리적 관계식으로 표현할 수 있다. k_1 은 공정 변수, λ 은 광원의 파장, NA 는 렌즈의 개구수(numeric aperture), n 은 렌즈와 물체 사이 매질의 굴절률이다. 기존 노광에서는 렌즈와 웨이퍼 사이의 매질이 공기이기 때문에 굴절률(n)이 1이었으나, immersion 노광은 굴절률이 약 1.33인 물을 매질로 사용한다. 따라서 렌즈의 NA 가 커지고 해상도가 높아진다.

b) (50 pts) EUV 노광은 기존의 노광 방식과 달리 reflective optics를 활용한다. 그 이유가 무엇인지 설명하시오.

EUV는 기존 노광 공정에 사용되는 ArF laser에 비해 파장이 10배 가까이 짧으며, 광자 에너지가 약 93eV로 매우 크다. 이에 따라 EUV는 ArF와 달리 렌즈에 흡수되고, 열을 발생시키므로 렌즈를 사용한 노광 방식을 사용할 수 없다. 따라서 EUV 노광은 거울을 사용하여 빛을 반사시키는 reflective optics를 사용해야 한다.

c) (100 pts) 위에서 언급한 immersion 그리고 EUV 노광 기술 외에도 기존의 193 nm 의 광원에서 오는 노광 한계를 극복하기 위한 다양한 접근 방법들이 시도되었고 사용되고 있다. 그 방법이 어떠한 것들이 있는지 적어도 3 가지 이상을 설명하시오.

1 - 멀티 패터닝 (더블 패터닝, 쿼드 패터닝)

노광과 식각 과정을 반복하여 여러 번에 걸쳐 패턴을 형성함으로써 해상도를 높이는 방식이다. 최대 해상도가 100nm인 광원이 있다고 가정하면, 패터닝을 2번 진행하는 더블 패터닝은 그의 1/2배인 50nm로 해상도를 높일 수 있으며, 4번 진행하는 쿼드 패터닝은 1/4배인 25nm로 해상도를 높일 수 있다. 장점으로는 기존 노드의 해상도보다 더 높은 수준으로 패터닝이 가능하다는 점이 있으며, 단점으로는 공정 시간이 오래 걸린다는 점이 있다.

2 - DSA 공정

DSA(Directed Self-Assembly)는 자기 조립을 통해 6~100nm 간격으로 나노 구조를 정렬할 수 있는 'Block copolymer'를 사용하는 기술이다. ArF 혹은 EUV 노광 장비를 활용해 pre-pattern을 만들고, 이 pre-pattern으로 block copolymer의 자기 조립을 유도함으로써 IC 패턴 등의 미세한 패터닝이 가능하다. DSA를 사용하면 기존 노광 장비의 pre-pattern에 비해 3배 높은 해상도를 구현할 수 있다. 멀티 패터닝에 비해 복잡한 LE 단계가 줄어든 기술이기 때문에 생산 비용이 낮다는 장점이 있다.1)

3 - EUV보다도 파장이 짧은 새로운 광원들의 개발

기존 ArF 광원의 노광 한계는 그보다 파장이 짧은 광원을 찾음으로써 해결할 수 있다. EUV보다 더 파장이 짧은 광원들이 새롭게 개발되고 있다. 7~8nm 파장의 광원을 만들 수 있는 'High-NA EUV', 6nm 파장의 BEUV(Beyond EUV)가 그 예이다.

ASML은 차세대 EUV라 불리는 'High-NA EUV' 장비를 2023년 출시한다는 목표를 세워두고 있다. 이 장비로 7~8nm 파장의 빛을 만들 수 있을 것으로 예상된다. 이 교수는 "BEUV(Beyond EUV)란 또 다른 빛도 연구되고 있다"고 말했다. 스위스 마이크로및나노기술연구소는 BEUV가 6nm대 파장의 빛으로 EUV보다 더 미세한 회로를 만들 수 있다고 2015년 국제학술지 '네이처'에 발표했다.2)

<Reference>

- 1) 한주엽. (2015). 차세대 반도체 공정 미세화 기술... DSA가 뜬다. *디지털데일리*. http://m.ddaily.co.kr/m/m_article/?no=136259 (2022-04-04 접속)
- 2) 서동준. (2021). '더 작게 더 뽕뽕하게' 반도체 집적기술은 지금도 '진화중'. *동아사이언스*. <https://www.dongascience.com/news.php?idx=48186> (2022-04-05 접속)

Problem Set #2

반도체 물질은 다양한 방법(예: thermal oxidation, electrochemical anodization, plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 등)으로 산화(oxidation)가 가능하다. 이러한 방법 중 열산화(thermal oxidation) 방법은 여전히 현대 실리콘 IC 기술의 주요 공정으로 활용하는 만큼 실리콘 소자 제작을 위해 매우 중요한 방법이다.

a) (75 pts) 만약 열산화 공정으로 실리콘 산화막(silicon oxide, SiO₂)의 두께를 x 만큼 성장하였다면 희생되는 (consumed) 실리콘 층의 두께는 얼마인지 volume of mol.의 개념을 통해 구체적으로 설명하시오.

Note) 실리콘의 molecular weight: 28.9 g/mol // 실리콘의 density: 2.33 g/cm³ //

실리콘 산화막의 molecular weight: 60.08 g/mol // 실리콘 산화막의 density: 2.21 g/cm³

dry oxidation 반응식 : Si (solid) + O₂ -> SiO₂ (Solid)

wet oxidation 반응식 : Si (solid) + 2H₂O -> SiO₂ (Solid) + H₂

dry oxidation과 wet oxidation 공정 모두 1몰의 실리콘(Si) 당 산화층(SiO_2) 1몰이 형성된다.

$$\text{실리콘 1몰당 부피} = \frac{\text{분자량}}{\text{밀도}} = \frac{28.9 \text{ (g/mol)}}{2.33 \text{ (g/cm}^3\text{)}} = 12.4 \text{ (cm}^3\text{/mol)}$$

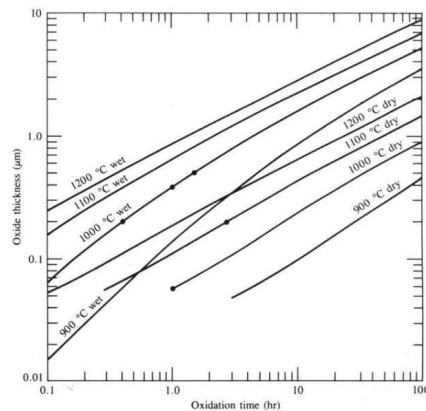
$$\text{산화층 1몰당 부피} = \frac{\text{분자량}}{\text{밀도}} = \frac{60.08 \text{ (g/mol)}}{2.21 \text{ (g/cm}^3\text{)}} = 27.18 \text{ (cm}^3\text{/mol)}$$

‘형성되는 산화층의 부피’ : ‘소모되는 실리콘의 부피’ = 27.18 : 12.4 이다.

따라서 실리콘과 산화층의 면적이 같다면, 형성되는 산화층의 두께가 x일 때 소모되는 실리콘의 두께는 $x \times \frac{12.4}{27.8} = 0.446x \approx 0.45x$ 이다.

답 : 0.45x

b) (75 pts) 실리콘 산화막의 두께를 0.3 μm 를 산화막이 없는 실리콘 기판 (Si substrate) 위에 1,000도의 온도에서 wet 산화 방식으로 형성시키고자 한다. 이를 위한 산화 시간을 아래 그래프를 활용하여 구하시오.



방법1) 육안으로 그래프 읽기

그래프를 보아, 1000°C에서 wet 산화 방식으로 산화막 0.3 μm 를 형성시키는 데 걸리는 시간은 약 0.7hr 이다.

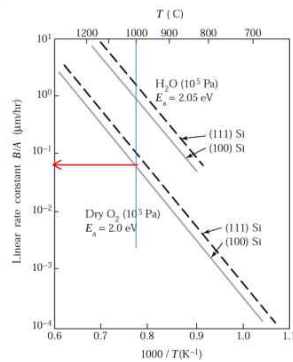
방법2) modeling & 상수 구하기

산화 시간에 따른 산화층의 두께는 아래와 같다.

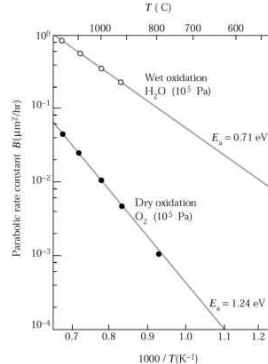
$$x = 0.5A \left[\sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(\tau + t)} - 1 \right]$$

강의 자료에 첨부된 아래 그래프들을 참고하여 보았을 때, 1000°C에서 wet oxidation의 linear rate constant(B/A)는 약 1.1이며, parabolic rate constant(B)는 약 0.35이다. 이를 통해 주어진 조건에서 $A = 0.32$, $B = 0.35$ 인 것을 알 수 있다.

● Linear rate constant



● Parabolic rate constant



이 값을 관계식에 대입 후 정리하면, $x = 0.16(\sqrt{1 + 13.67(\tau + t)} - 1)$

그래프에서 확인할 수 있는 값을 대입하여 τ 를 구할 수 있을 것이다. 1000에서 1hr 산화시켰을 때 $0.4\mu\text{m}$ 의 산화층이 형성되는 것으로 확인되므로 이를 식에 대입한다.

$$0.4 = 0.16(\sqrt{1 + 13.67(\tau + 1)} - 1)$$

$$2.5 = \sqrt{1 + 13.67(\tau + 1)} - 1$$

$$11.25 = 13.67(\tau + 1)$$

$$0.82 = \tau + 1$$

$$\tau = -0.18$$

구하고자 하는 값은 $x = 0.3\mu\text{m}$ 이 형성되기까지의 산화 시간이다. 위 과정들을 통해 구한 최종식에 값을 대입하면 다음과 같다.

$$0.3 = 0.16(\sqrt{1 + 20(-0.18 + t)} - 1), \quad t = 0.71$$

계산 결과, 0.71hr의 시간이 소요된다. 방법1로부터 구한 산화 시간과 거의 동일하다.