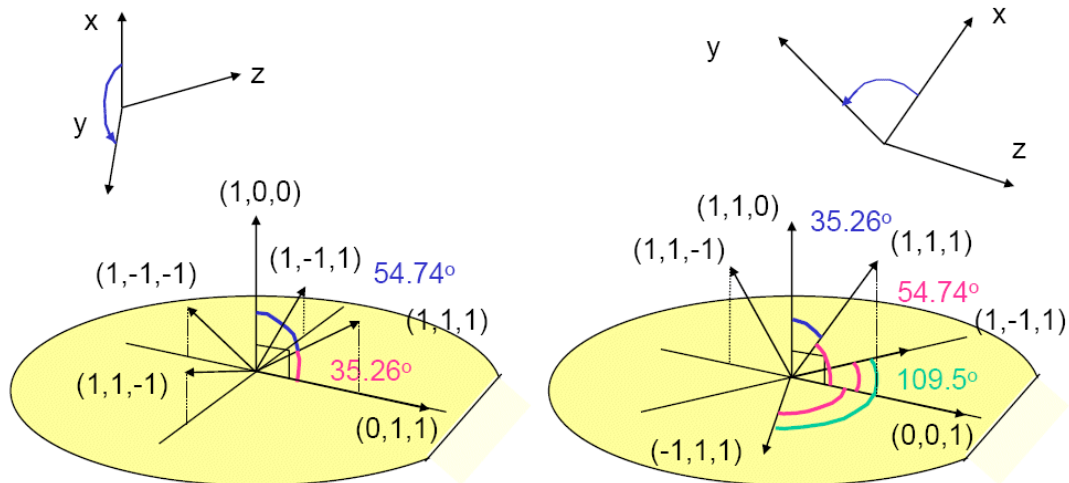
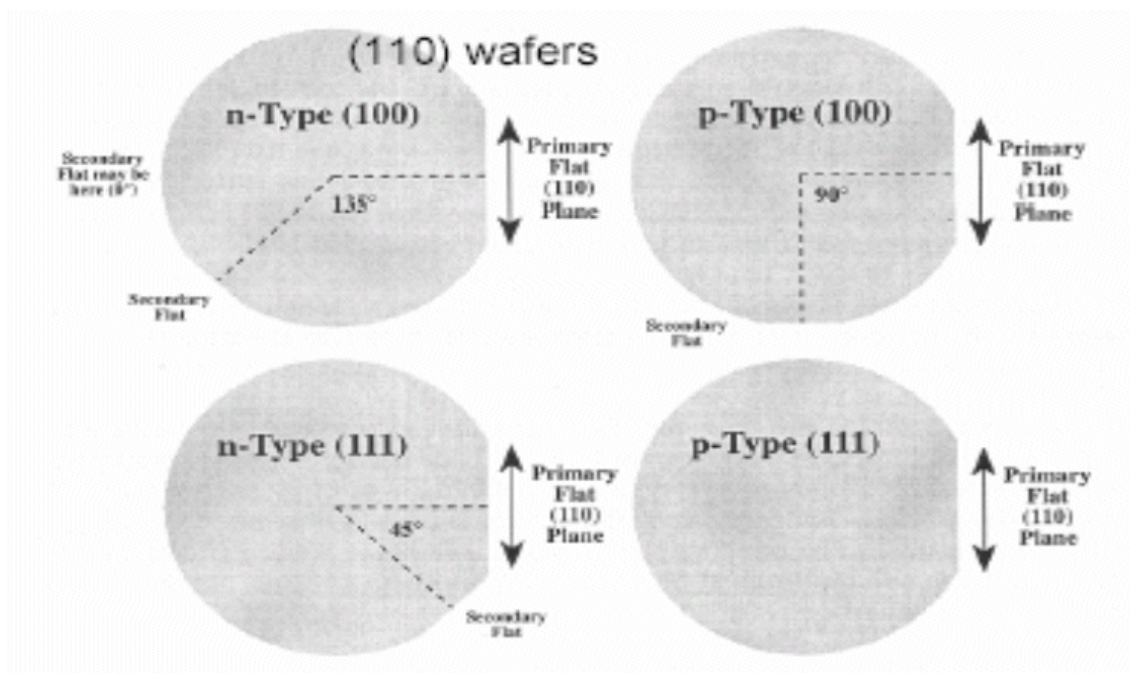


[1](100) wafer 와 (110) wafer에서의 주요 면 방향과 (111)면 방향과의 관계를 표현하라(각 웨이퍼에서 x,y,z 방향 벡터를 확실히 표시하고 그림을 그릴 것)(8)



(111) planes in the (100) oriented wafer (111) planes in the (110) oriented wafer

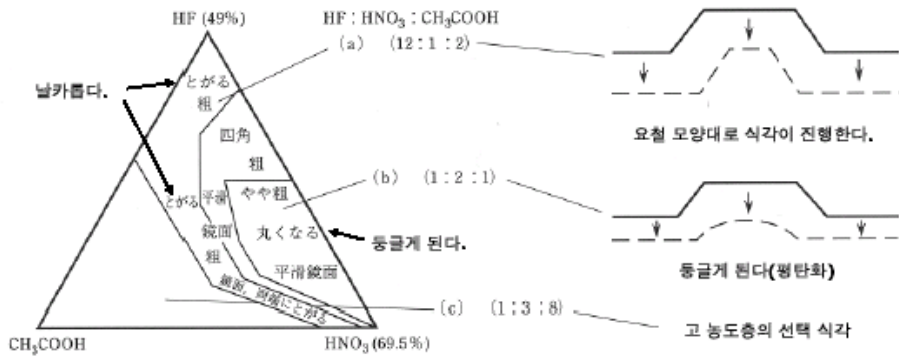
2. 또한, 웨이퍼 종류(n-type(100), p-type(100), n-type(111), p-type(111)) 별로 primary flat과 second flat에 대해서 표현하라 (8)



[3] 실리콘 습식 식각 용액에는 여러가지가 있으나, HNA, KOH, TMAH, EDP 등을 주로 사용한다. 각 식각액의 특성을 기술하고 장단점을 논하라(20)

(1) HNA(HF, HNO₃, CH₃COOH)

HNA는 isotropic etching에 사용되는 etchant로 HF와 HNO₃, CH₃COOH의 혼합으로 구성된다. HNO₃는 Silicon을 산화시키는 특성을 가지고 있고, HF의 fluoride ion은 용해 가능한 silicon compound인 H₂SiF₆를 생성한다. CH₃COOH는 HNO₃가 NO₃⁻이나 NO₂⁻로 분해하는 것을 막고, silicon의 산화에 직접적으로 관여하는 성분을 만들어주는 역할을 한다(N₂O₄ ⇌ 2NO₂). CH₃COOH가 없을 경우에도 NO₂가 없어질 때까지 잠시 식각이 계속된다.



HF-HNO₃ 계 etchant에 의한 실리콘의 등방성 식각

Etch rate은 용액의 조성(구성비)과 silicon doping에 영향을 받는다. 그러나 SiO₂를 비교적 빠른 속도(30~70 nm/min)로 상하게 한다는 단점이 있다.

Light doping된 영역은 heavily doped region보다 150배 정도 더디게 식각된다는 점에 유의해야 한다.

(2) KOH

일반적으로 anisotropic etchant로써의 특징을 가지고 있으며, 72℃, 15 wt.% KOH에서 최대 etch rate인 55μm/h의 특성을 가진다. KOH 입자는 물이 제거된 상태이나, 공기와 접하면 빠르게 H₂O를 흡수한다. 물이 없으면 반응이 잘 일어나지 않는 특성이 있어서, 농도가 증가하면 물 농도의 4승에 비례하여 etch rate이 감소한다. 20 wt.% 이하에서는 표면이 거칠고 녹지 않는 침전물이 생긴다. 따라서 wet etching시 일반적으로 40 wt.%의 용액을 사용한다.

또한 Metal-oxide-semiconductor(MOS) TR을 제작하는 데에 치명적인 해를 주는 alkali 이온(특히 Na^+)을 포함하지 않는 ammonium hydroxide(NH_4OH) 또는 “quaternary ammonium” compounds를 사용하기도

한다.

그리고 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이상의 doping 농도에서는 etch rate이 급격히 감소하는 특성이 있다. 이것은 doping이 많이 된 영역에서는 silicon 표면에서의 공간 전하 영역층의 폭이 급격히 줄어들어서, 산화반응에 의해 생성되는 전자가 표면에 고정되기 보다는 재결합이 쉽게 이루어지기 때문이다. 이렇게 가용한 전자가 감소하면서 식각 반응에 절대적으로 필요한 OH^- 이온을 만드는 물이 환원되는 것을 어렵게 만들고, 결과적으로 KOH의 etch rate가 급격히 감소하게 된다.

또 다른 특징은 IPA(Isopropyl alcohol)을 충분히 첨가할 때 (111)과 (100)면의 선택비를 높일 수 있다는 것이다. 예를 들어 IPA를 첨가하지 않은 40 wt.% KOH의 경우 (111)과 (100)간의 선택비는 8이었는데, IPA로 포화 시킨 이후에는 약 34 정도가 된다.

마지막으로 EDP나 TMAH액으로는 절대로 얻을 수 없을 정도로 식각된 (111)면이 매우 깨끗한 것을 특징으로 볼 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 Micro Mirror를 만들 때 silicon의 KOH etching을 이용한다.

(3)TMAH(Tetramethyl Ammonium Hydroxide)

Anisotropic etchant로써, ammonia-based etchant의 단점인 slow etch rate, hillock formation, 가열 했을 때 급격히 ammonia gas가 증발하는 것들을 보완하기 위해 Ammonia-based etchant의 대용으로 사용된다.

TMAH는 EDP보다 안전하고 첨가제로 Al이 식각되는 것을 방지할 수 있다. 그러나 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이상의 boron-doping에 대해서 식각이 느려지는 성질이 있다. 비교적 값이 싸다.

Alkali hydroxides를 사용하지 못하는 경우에 보통 EDP보다 TMAH를 더 선호한다.

그러나 표면 조도가 거칠고 (100):(111)의 선택비가 alkali hydroxides보다 나쁘다. 90°C , 10~40 wt.%에서 10~35에 불과하고 식각율도 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}/\text{min}$ 이다. 일반적으로 농도가 높아지면 식각율과 면 거칠기가 감소한다. 그러나 etch rate이 나빠지므로 양자간에 적절한 trade-off가 이루어져야 한다. Tabata의 논문에 의하면 표면 거칠기와 식각시 Al 손상을 trade off하면 10 wt.%가 적당하다고 한다.

-EDP(Ethylene Diamine Pyrochatechol)

EDP, 또는 EPW(Ethylene Diamine Pyrochatechol Water)라고 한다. 예전부터 사용되어 왔으며 부식성이 강하고 발암성이어서 위험하고, anisotropic etching에 쓰인다. Silicon의 doping 정도에 따라 선택 비가 커지는 특성을

가지고 있다.

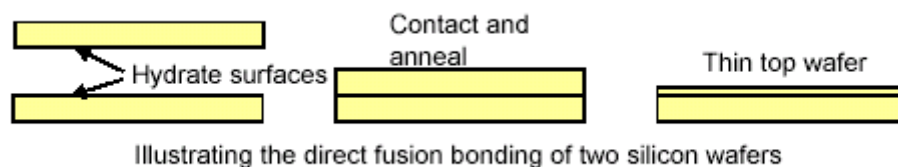
(100):(111)의 선택비는 Alkali hydroxides 식각액보다 훨씬 낮은 35 정도이지만, heavy p-type doping시의 선택비는 매우 크다. EDP 식각액 사용시 mask로는 SiO_2 , Si_3N_4 , Au, Cr, Ag, Cu, Ta 등이 사용되며 Al을 빨리 녹이는 특성을 가지고 있다. 가장 낮은 Al 식각율이 400:1(Al:(100)Si)이나 된다.

EDP etchant는 위험성 때문에 reflux condenser를 반드시 사용해야 하고, 대부분의 IC 제작 공정 청정실에서는 사용하지 못한다.

[4] 기판 접합에는 direct bonding과 anodic bonding이 있다. 각각을 비교 설명하라(10).

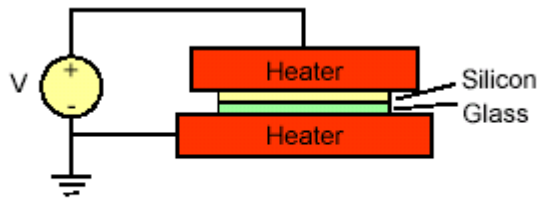
(1) Direct wafer bonding

1000℃ 정도의 고온에서 직접 wafer끼리 붙이는 방법이다. Hydration을 이용해 wafer가 bonding되기 전에 면을 고르고 gap을 만들어 bonding을 균일하지 못하게 하는 particle을 제거하는 cleaning & hydration을 한다. Hydration된 surface에 wafer를 서로 맞대어 놓고 압력을 가하며 hydration bonding을 한다. 두 wafer는 고온의 furnace에서 압력을 받으면서 융합되어 냉각 후 원래 단일 silicon wafer일 때만큼 강력하게 bonding된다. Bonding이 끝난 후에 Top wafer는 wet etching이나 mechanical grinding, 또는 표면의 polishing을 통해서 얇게 만들 수 있다.



(2) Anodic Bonding

silicon wafer와 glasses를 전기적인 결합을 통해 bonding할 때 사용된다. Anodic bonding의 메커니즘은 glasses 내부에 있는 sodium ion들의 움직임과 관련이 있다. Pyrex 7740 glass는 silicon과 비슷한 열팽창을 하는 것이 장점으로 anodic bonding의 주재료로 이용된다. Silicon wafer 사이에 pyrex 7740 glass를 놓고 500℃의 고온으로 가열하면서 silicon wafer에 300~700V의 전압을 걸어 주어 glass의 표면으로부터 sodium ion을 이동시켜 glass 표면에서 net negative charge가 발생하도록 해준다.



Apparatus for anodic bonding of silicon to glass

양으로 charge된 silicon wafer와 음으로 charge된 glass의 표면으로부터 인력이 작용하여 각각이 결착하게 되고, 고온의 에너지를 받아 융합하게 된다. Bonding시에는 마치 저항을 양단에 연결해 놓은 것처럼 일정량 이상의 전류가 반드시 흐르게 되고 시간이 지나 bonding이 완료되면 전류는 다시 0으로 떨어진다. 전압이 충분하지 못하거나 여타의 이유로 일정량 이상의 전류가 흐르지 못하게 되면 bonding이 제대로 이루어지지 않게 된다.

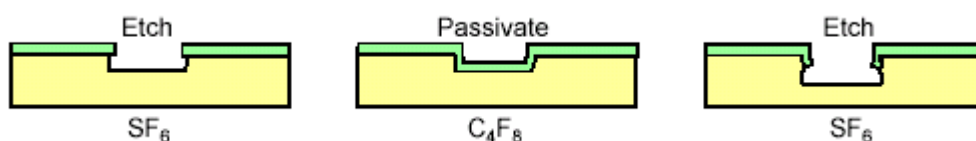
[5] Bosch 사가 개발한 Deep RIE 방식에 대해서 기술하고, micro loading, footing, scalloping에 대해서 기술하라(10).

(1) Bosch 사의 Deep RIE 방식

Deep RIE(방향성 이온 식각)란 Deep Reactive Ion Etching의 약어로 glow discharge의 이점을 취하여 polymeric 한 원자간의 화학적인 교차 결합을 발생한다. 부분의 plasma 공정은 polymeric material의 deposition과 제거로 이루어진다. 일반적으로 잘 designed된 plasma chemistry가 deposition보다 제거에 강점을 받고 있는데 반해, Bosch가 개발한 deep RIE 공정은 etchant로부터의 polymer depositoin이 크게 향상되었다.

Deep RIE process

- ① PR 이나 SiO₂ 또는 SiN 를 마스크로 사용한다.
- ② C₄F₈ plasma 를 이용한 polymer deposition 과 SF₆ plasma 를 이용한 polymer와 Si의 반응성 이온식각을 교대로 반복한다.
- ③식각 과정에서 SF₆ plasma 의 직진성으로 인해 바닥면의 polymer가 깎이면서 Si 표면이 드러나고, 이어서 Si이 깎이는 반면 , 벽면은 polymer 로 보호 받으므로 수직 식각이 이루어 진다.



(2) micro loading effects

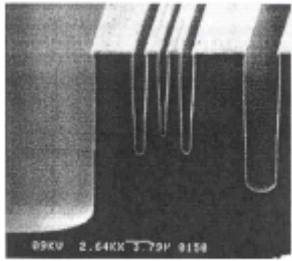
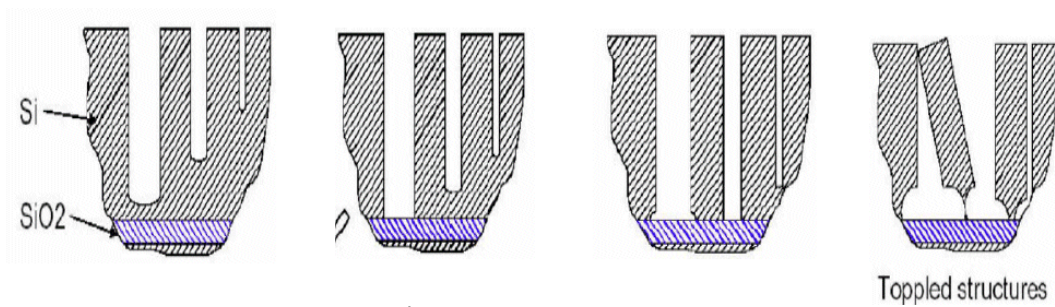


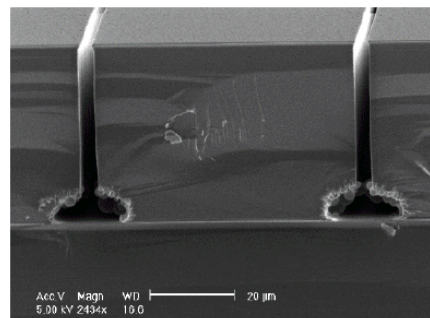
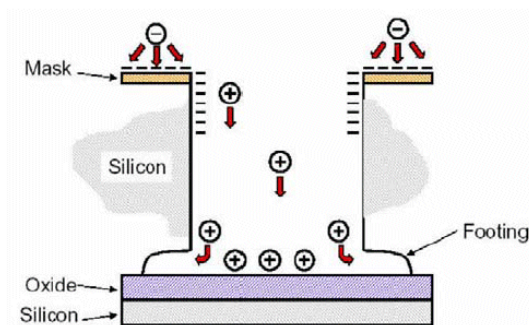
Fig. Microloading effect

식각되는 표면적의 넓이에 따라 식각 속도가 달라지는 현상을 말한다. 표면이 넓을수록, 반응 후의 부산물 가스가 빠져 나가고 다시 식각 가스가 들어 오기 용이 하므로 이런 현상이 발생한다.

(3) Footing effects



<그림 1. Footing in Deep RIE Process>



<그림 2. Footing formation>

반응성 이온 식각반응에서, 전하를 띄는 이온이 수직 식각 과정에서 바닥면의 절연체를 만나면, 수직 식각은 더 이상 일어나지 않고, 바닥의 옆면으로 식각되어 들어가는 현상을 말한다. 이온이 절연체와 충돌하여 절연체 charging 이 일어나고, 이로 인해 입사하는 이온이 벽면으로 튕겨나가는 것이 원인으로 여겨지고 있다. Footing effect 로 인해 수직 기둥의 바닥면이 깎여 나가면서 구조체 붕괴의 원인이 된다

이를 막기 위해 절연체 대신에 금속을 바닥면에 깔아 두기도 한다.

(3)Scalloping

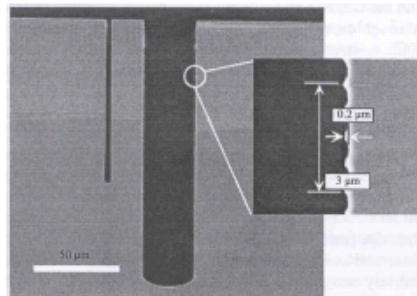
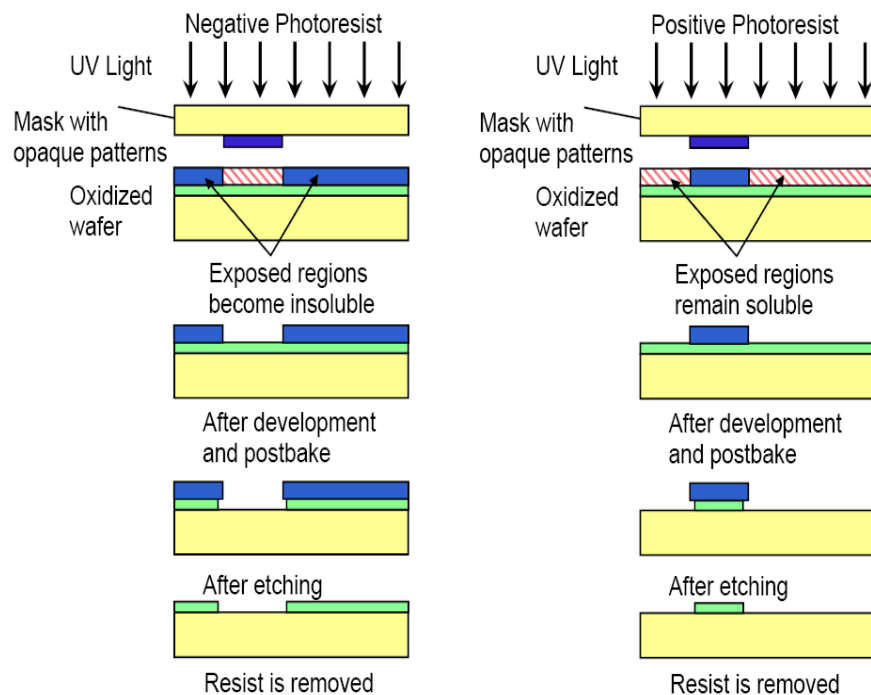


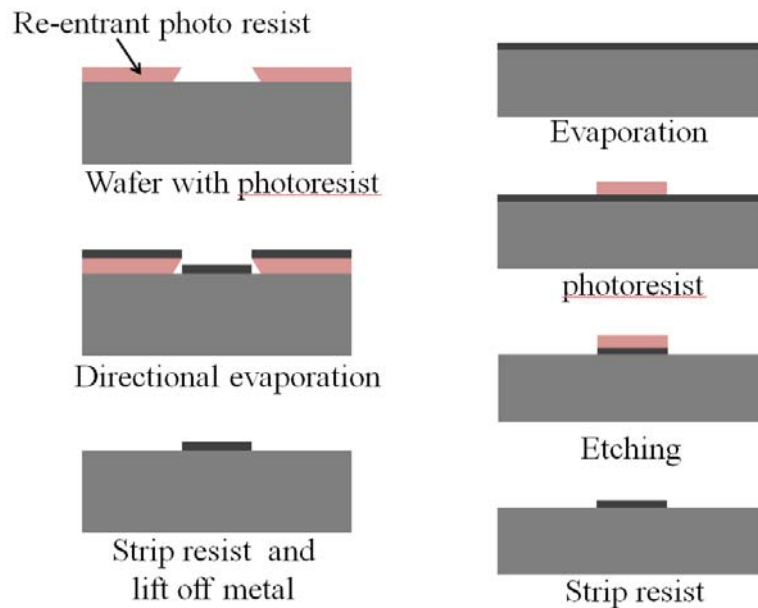
Photo of features etched in silicon with DRIE. Note that the slender trench etches at a slower rate than the wider trench.

DREI 과정에서 polymer를 깎아내고 , 드러나는 Si 을 식각 할 때 바닥면 뿐만 아니라 polymer 로 보호되지 않는 옆면으로도 둥글게 식각된다.. 이후 polymer가 증착되면 둥글게 깎인 옆면은 polymer로 보호되어 이후 식각 과정에서 둥근 면을 유지하며 더 이상 깎이지 않고 남아있게 된다. 이러한 과정이 반복되면 위의 그림과 같이 수직 식각된 옆면으로 굴곡진 면이 반복되어 나타나게 된다. 이를 scalloping 이라 한다. 현재까지 이를 막기 위한 공정 기술은 개발되지 못하였다.

[6] Positive PR 을 사용하는 경우와 Negative PR을 사용하는 경우, 동일한 photo mask 를 사용한다면 어떤 단면의 구조물이 형성되는지를 그림(단면, 공정도)으로 그려서 각각을 표현하라(7점)



[7] Lift off 공정과 etching 공정을 비교하고 공정 단면도를 다른 점을 설명하라(7점).



<Lift-off>

<Etching>

Lift-off 공정은 먼저 단면의 경사면이 안으로 요철이 진 Photoresist 패턴을 웨이퍼 위에 형성을 한 후, 금속을 올리고 photoresist를 제거하여 원하는 형상의 금속만을 남기는 과정을 거친다. 반면 etching 공정은 웨이퍼 위에 금속을 먼저 전면으로 올린 후 photoresist 패턴을 만들고 이를 etch mask로 사용하여 금속을 etching 한 후 photoresist를 제거하는 과정을 거쳐서 원하는 금속 형상을 얻는다.

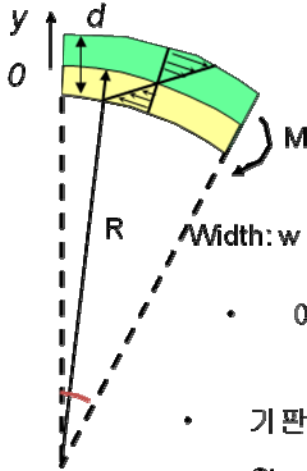
[8]Stony formula 유도

- 기판의 휨에 영향을 미치는 모멘트의 식

$$((d_f + d_s)/2)F_f = M_f + M_s$$

- 스트레스가 힘의 중심으로부터 선형적으로 존재한다고 하면,

$$\sigma_m = E \left\{ \frac{(R \pm d/2)\theta - R\theta}{R\theta} \right\} = \pm \frac{Ed}{2R}$$



- 이러한 스트레스에 해당하는 빔의 휨 모멘트는

$$M = 2 \int_0^{d/2} \sigma_m w \left(\frac{y}{d/2} \right) y dy = \frac{\sigma_m d^2 w}{6} = \frac{Ed^3 w}{12 R}$$

- 이 식을 각 층에 적용하면

$$M_f = E_f d_f^3 w / 12 R, \quad M_s = E_s d_s^3 w / 12 R$$

- 이 식을 제일 위의 식에 대입하고,

$$((d_f + d_s)/2)F_f = [E_f d_f^3 + E_s d_s^3] w / 12 R$$

- 기판이 막보다 아주 두껍다고 하면 $\sigma_f = \frac{F_f}{d_f w} = \frac{1}{6R} \frac{E_s d_s^2}{d_f}$
Stony formula 가 얻어진다.

[9]

(a) 캔티레버의 곡률 식을 구하라

$$w = \frac{3}{2} w_{\max} \left(\frac{x}{L_c} \right)^2 \left(1 - \frac{x}{3L_c} \right) \text{ 이고 곡률은 } \frac{1}{\rho} = \left| \frac{d^2 w}{dx^2} \right| \text{ 이므로,}$$

$$\text{곡률은 } \frac{1}{\rho} = \left| \frac{d^2 w}{dx^2} \right| = \frac{3 w_{\max} (L_c - x)}{L_c}; \text{ 이다.}$$

(b) 저항 변화율은 아래 식에 의하여 구할 수 있다.

$$\Delta R / R = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \pi_l \sigma_l + \nu \pi_t \sigma_l = 7 \times 10^{-10} \times 57 \times 10^6 + 0.06 \times (-6) \times 10^{-10} \times 57 \times 10^6 = 0.0378$$

-> 3.78%