

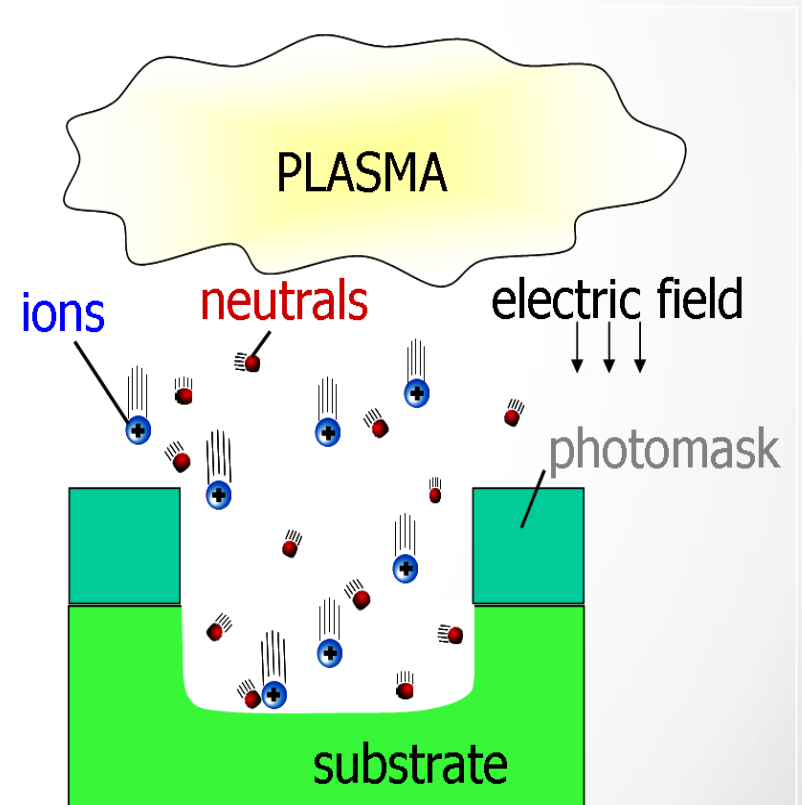
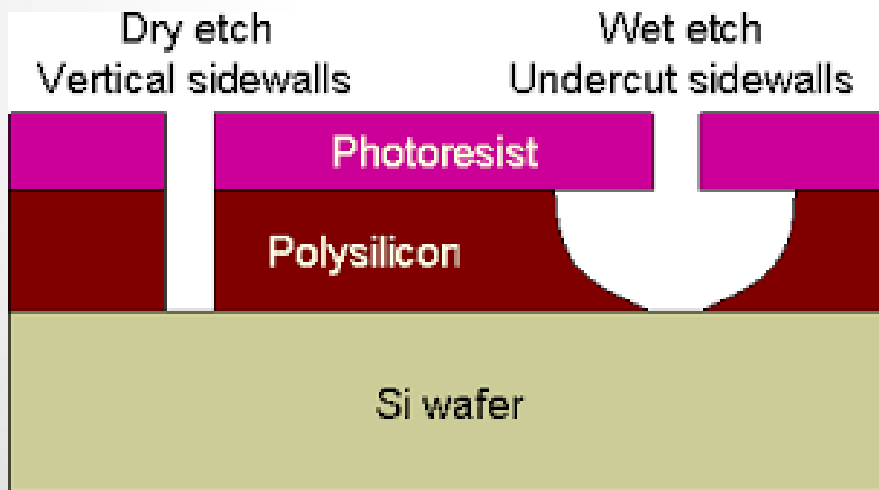


# Tehnologije mikrosistema

**Prof. dr Vesna Paunović**

# Vrste nagrivanja

- Vlažno nagrivanje
- Suvo nagrivanje
- Plazma nagrivanje





# Procesi vlažnog nagrivanja

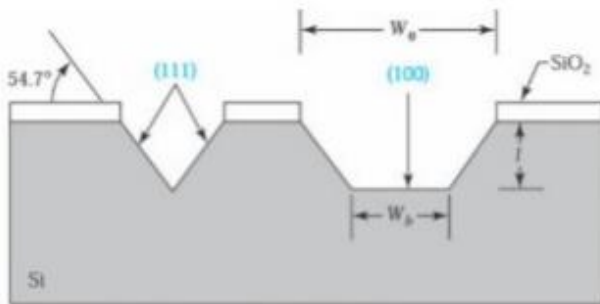
(wet etching)

- **Glavni koraci procesa vlažnog nagrivanja:**
  - Transport reaktanata do površine
  - Hemijska reakcija na površini
  - Transport produkata reakcije sa površine
- **Glavni sastojci sredstva za nagrivanje:**
  - **Oksidujuće sredstvo**
    - Primer:  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HNO}_3$
  - **Kiselina ili baza za rastvaranje oksidovane površine**
    - Primer:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$
  - **Rastvarač za transport reaktanata i produkata reakcije**
    - Primer:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$

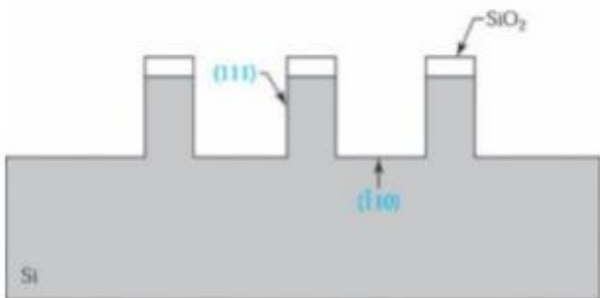


# Procesi vlažnog nagrizanja

- **Profili:** izotropni i anizotropni
- **Primena:** Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, metali
- **Kontrola:** maskirajući materijali, dopiranje, elektrohemijska



$$W_b = W_0 - \sqrt{2}l$$



Vlažno nagrizanje



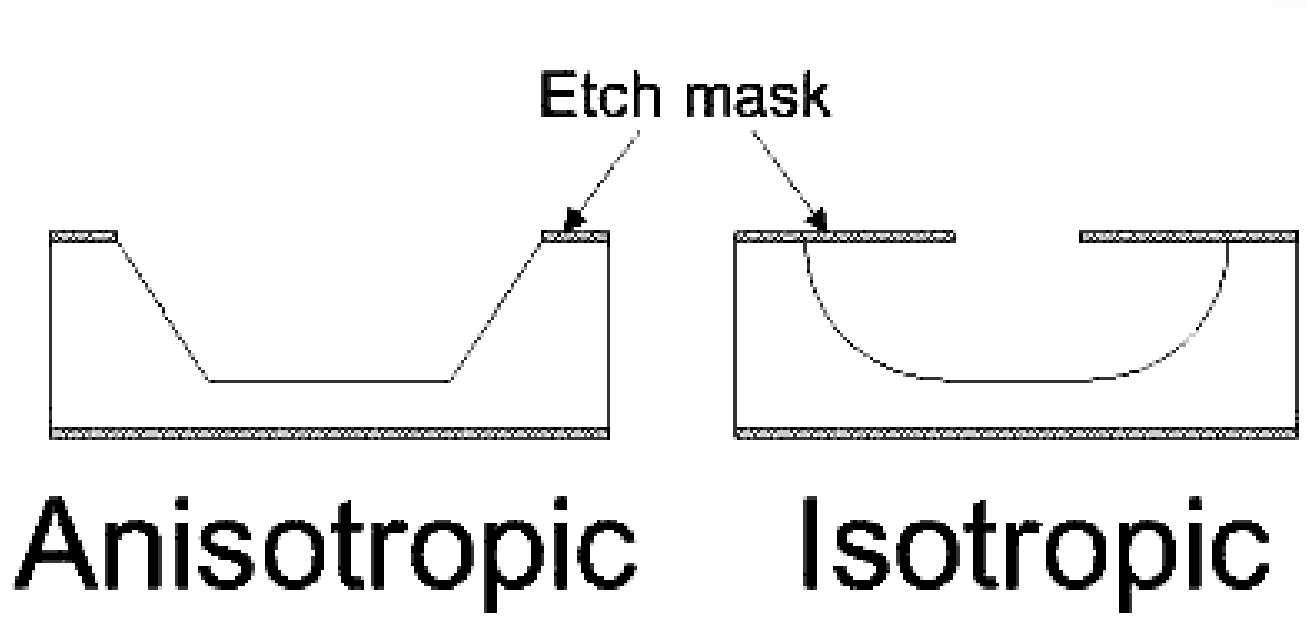


# Procesi vlažnog nagrivanja

- **Izotropno nagrivanje:**
  - Jednaka brzina nagrivanja u svim pravcima
  - Lateralna brzina nagrivanja je skoro ista kao vertikalna
  - Brzina nagrivanja ne zavisi od orijentacije ivice maske
- **Anizotropno nagrivanje:**
  - Brzina nagrivanja zavisi od orijentacije kristalnih ravni
  - Lateralna brzina nagrivanja može biti mnogo veća ili mnogo manja od vertikalne, što zavisi od orijentacije ivice maske u odnosu na kristalografske ose
  - Orijehtacija ivice maske i detalji šeme na maski određuju konačan oblik nagrivanja
    - Može biti korisno u stvaranju kompleksnih oblika
    - Može biti čudno kada nije dobro osmišljeno
    - Samo su standardni oblici rutinski

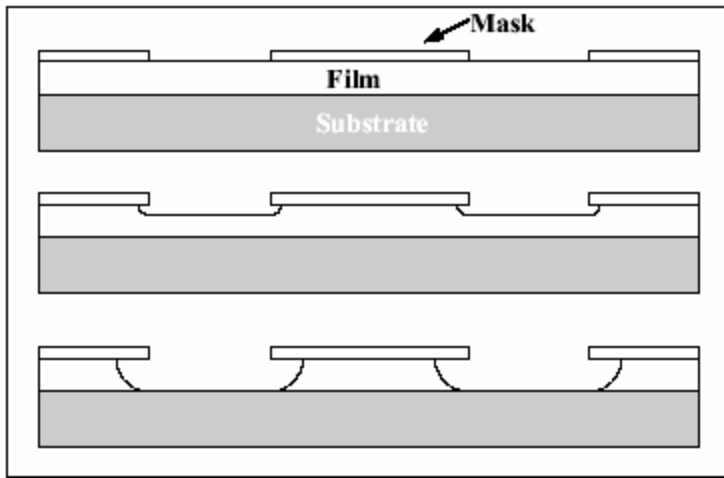
# Procesi vlažnog nagrizanja

- Izotropno nagrizanje
- Anizotropno nagrizanje

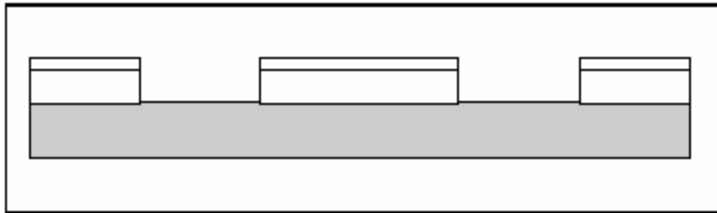




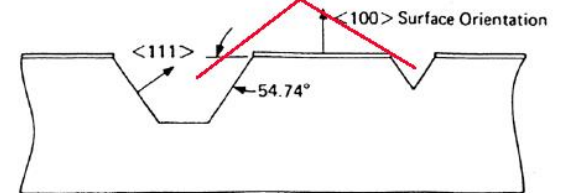
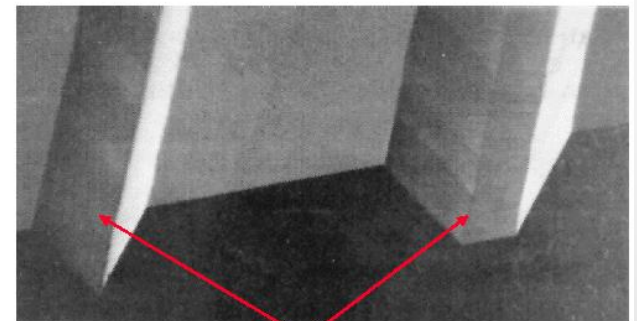
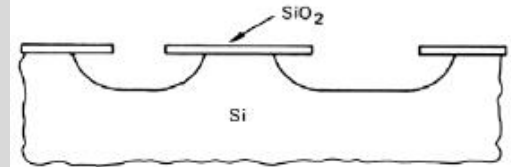
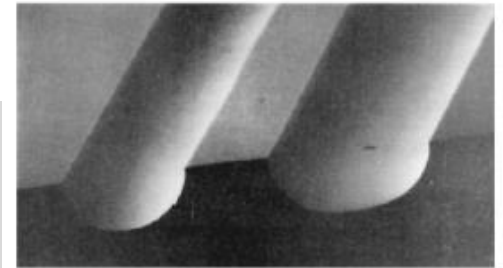
# Procesi vlažnog nagrizanja



isotropic etching



anisotropic etching





# Nagrizanje Si

- **Izotropno:**
  - HF:HNO<sub>3</sub>:CH<sub>3</sub>COOH (Hydrofluoric+Nitric+Acetic acids – HNA)
  - HF
  - HF:NH<sub>4</sub>F
- **Anizotropno:**
  - KOH
  - EDP (Ethylene Diamine Pirochatechol)
  - (CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>NOH (TetraMethyl Ammonium Hydroxide – TMAH)
  - CsOH
  - NaOH
  - N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O (Hydrazine)
- **Maskirajući materijali:**
  - Fotorezist
  - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
  - SiO<sub>2</sub>



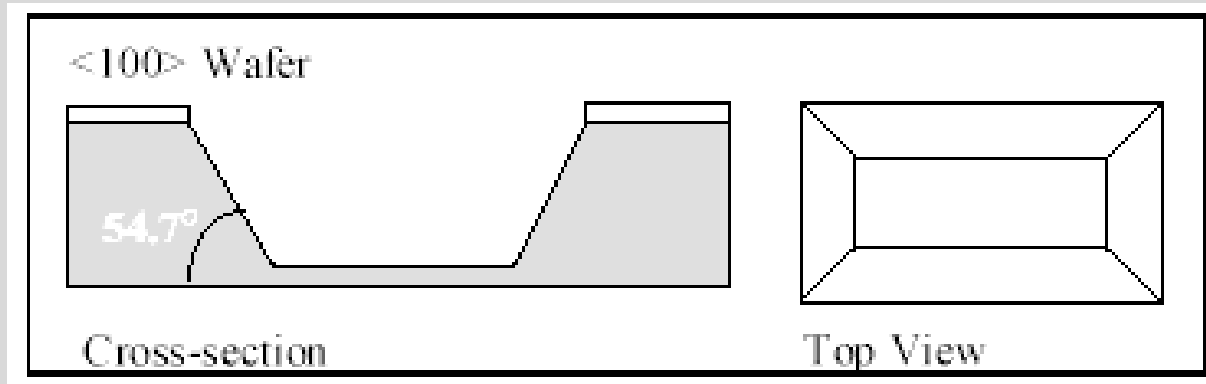


# Anizotropno nagrivanje Si pomoću KOH

- Brzina nagrivanja varira sa T i koncentracijom:

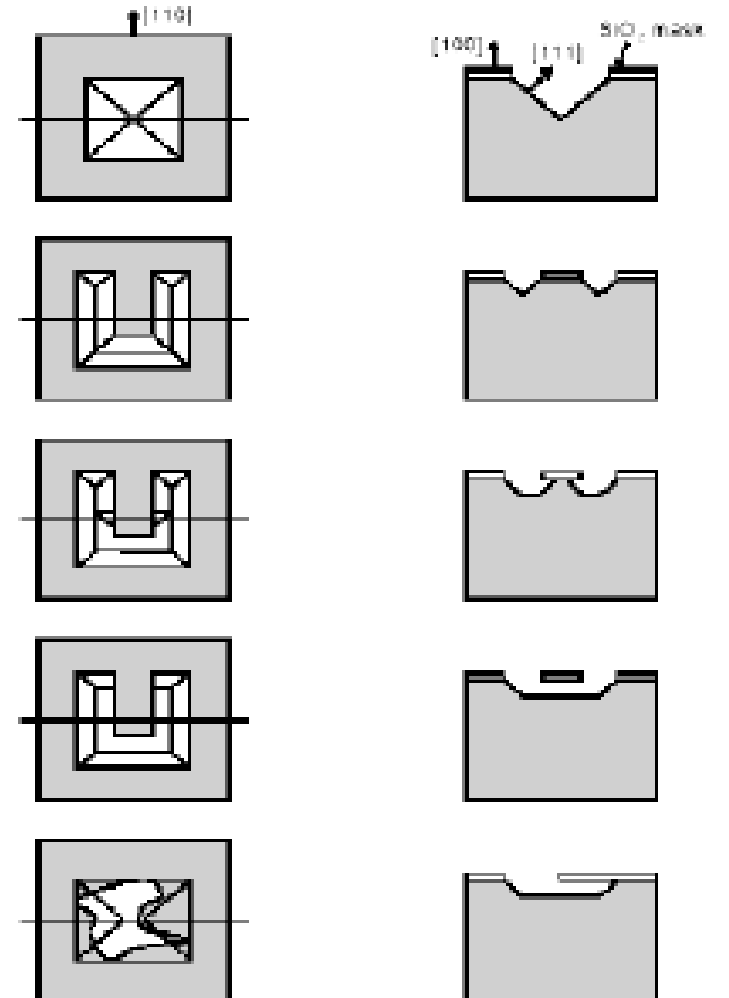
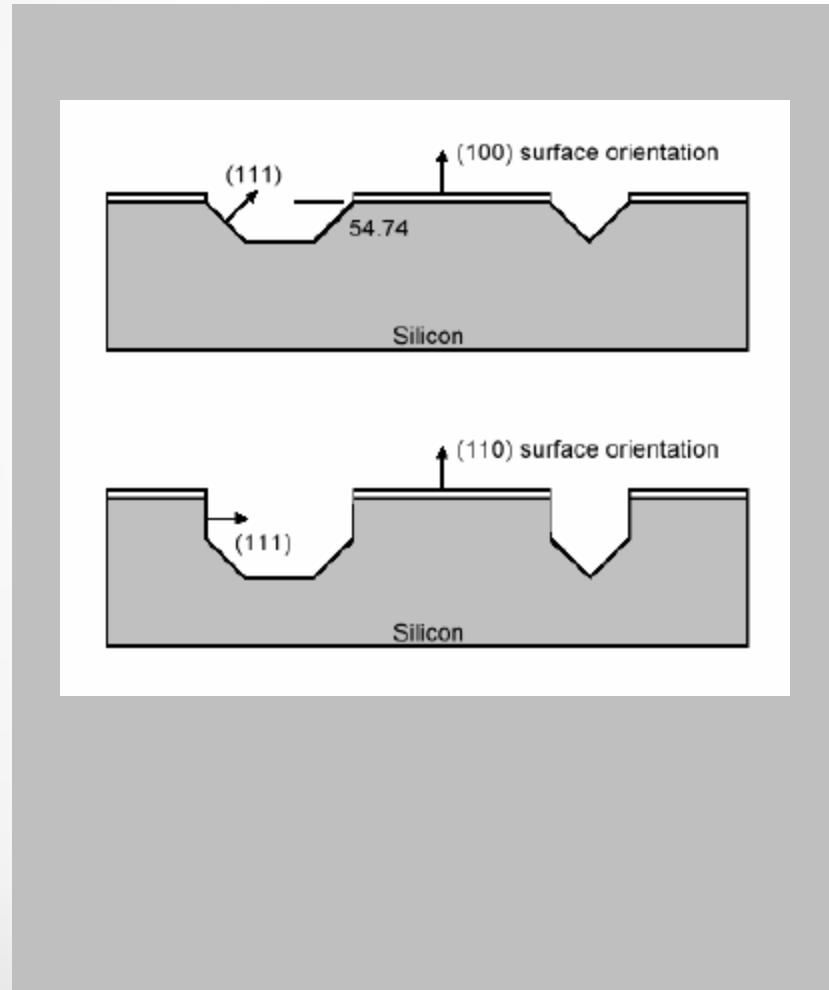
$$R = k_0 [H_2O]^4 [KOH]^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

- (110):(100):(111)=600:400:1





# Anizotropno nagrizanje Si



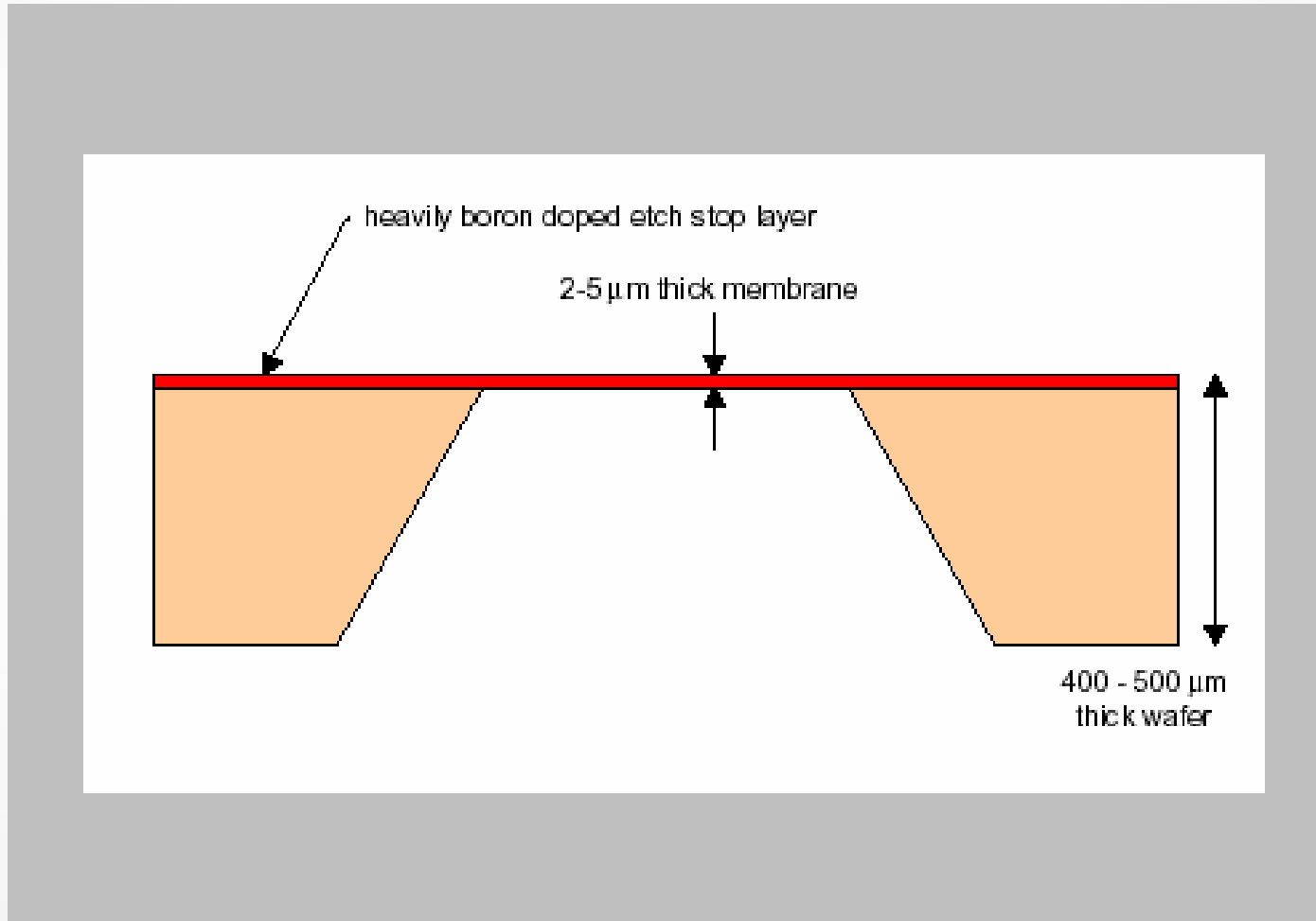


# Slojevi za stopiranje anizotropnog nagrivanja Si

- Kontrola apsolutne dubine nagrivanja je teška
- Slojevi za stopiranje nagrivanja drastično smanjuju brzinu nagrivanja
- Za nagrivanje Si koriste se **slojevi dopirani B**
- Primeri:
  - Brzina nagrivanja KOH se redukuje 20x za  $N_B > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
  - Brzina nagrivanja NaOH se redukuje 10x za  $N_B > 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
  - Brzina nagrivanja EDP se redukuje 50x za  $N_B > 7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
  - Brzina izotropnog nagrivanja HNA se povećava sa  $N_B$

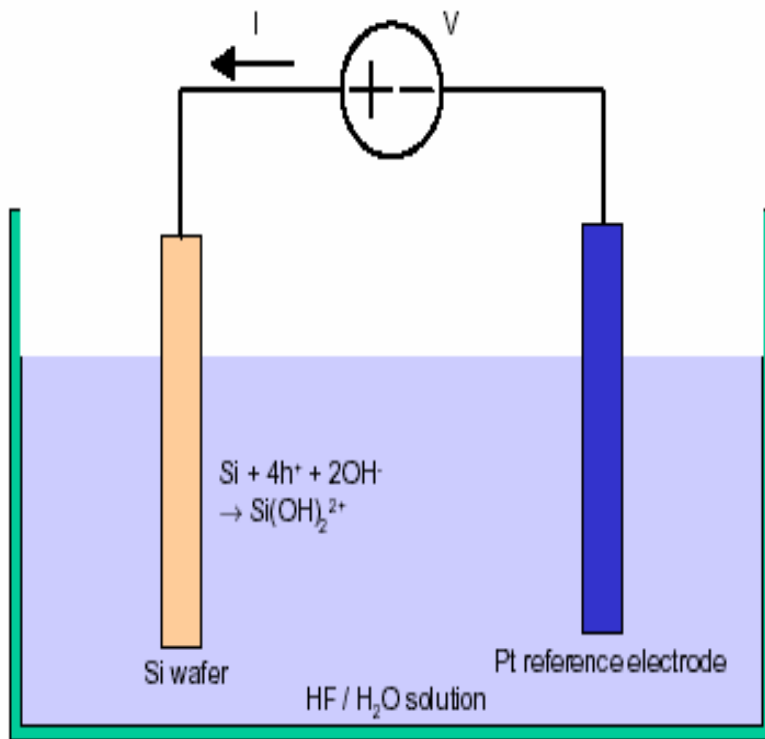


# Slojevi za stopiranje anizotropnog nagrizanja Si





# Elektrohemijsko nagrivanje Si



- Pozitivnim polarisanjem Si pločice, šupljine se injektuju iz spoljašnjeg kola, oksidišu Si i formiraju hidroksid koji se rastvara u HF
- Ovo nagrivanje se koristi za poliranje Si pločica
- Efikasno se maskira filmovima Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>



# Vlažno nagrivanje filmova

## Dielektrični filmovi

- **Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**
  - 1% HF, brzina 60 nm/min
  - 10% HF, brzina 500 nm/min
  - BHF, brzina 0.5-1 nm/min
- **SiO<sub>2</sub>**
  - BHF, brzina 100-250 nm/min
  - HF, brzina velika

## Metalni filmovi

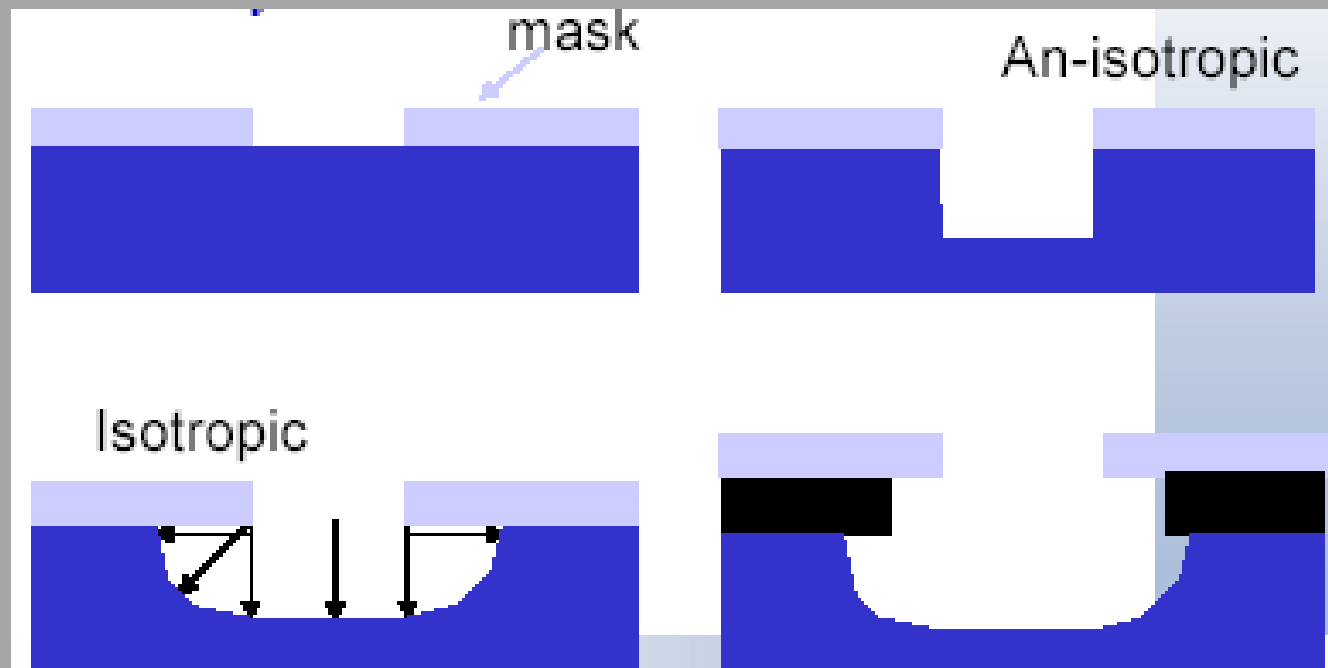
- **Cu i Ni**
  - 30%FeCl<sub>3</sub>
  - 30%H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:70%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
  - KJ:J<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O
- **Cr**
  - 75%HCl:25%HNO<sub>3</sub>
  - HCl:Glicerol
- **Au**
  - 75%HCl:25%HNO<sub>3</sub>
  - Alkalni cijanid / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- **Ag**
  - HNO<sub>3</sub>



# Procesi suvog nagrivanja

(dry etching)

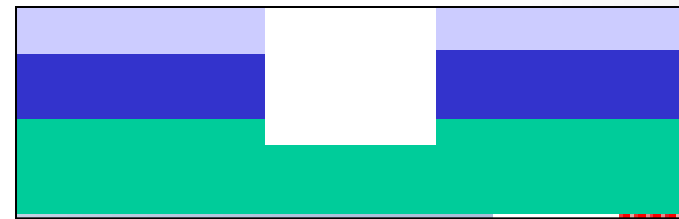
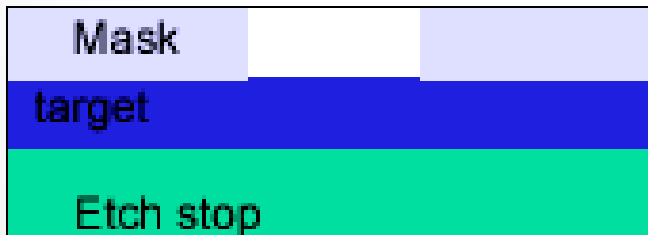
- Sredstva za izotropno nagrivanje uklanjaju materijal istom brzinom u svim pravcima





# Procesi suvog nagrivanja

- **Selektivnost nagrivanja:** odnos brzine nagrivanja materijala koga treba ukloniti prema brzini nagrivanja drugih materijala
- Selektivnost maskirajućih materijala i slojeva za stopiranje nagrivanja je od izuzetnog značaja







# Procesi suvog nagrivanja

- **Suvo nagrivanje** - uklanjanje materijala reakcijama koje se odvijaju u gasovitoj fazi
- Vrste suvog nagrivanja:
  - **Nagrivanje bez plazme** – koristi spontanu reakciju odgovarajuće smeše reaktivnih gasova
  - **Nagrivanje sa plazmom** – koristi RF snagu za pobudu hemijske reakcije



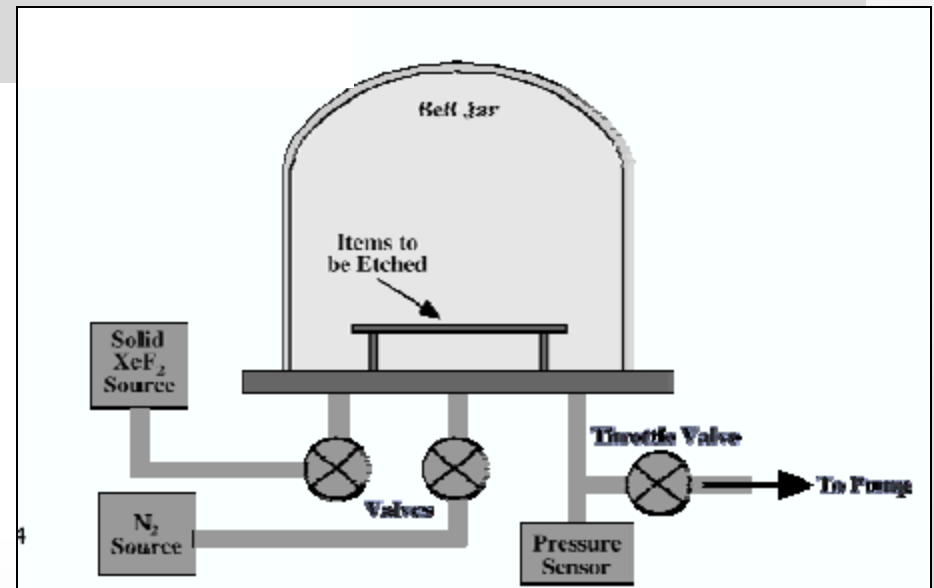
# Suvo nagrivanje bez plazme

- Odvija se u gasovima koji sadrže fluor - fluoridima i interhalogenima
- Obezbedjuje izotropno nagrivanje Si
- Visoka selektivnost maskirajućih filmova
- Kontrola putem temperature i parcijalnih pritisaka reaktanata



# Nagrizanje ksenon-difluoridom ( $\text{XeF}_2$ )

- $2\text{XeF}_2 + \text{Si} = 2\text{Xe} + \text{SiF}_4$
- Izotropno nagrivanje Si
- Visoka selektivnost za  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , fotoreziste, PSG, Al
- Tokom egzotermne reakcije generiše se toplota





## Nagrizanje interhalogenima ( $\text{BrF}_3$ i $\text{ClF}_3$ )

- Gasovi reaguju sa Si i formiraju  $\text{SiF}_4$
- Skoro izotropan profil nagrizanja
- Maskirajući materijali:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , fotorezist, Al, Cu, Au i Ni



# Suvo nagrivanje sa plazmom

- Koristi RF snagu za pobudu hemijske reakcije
- Vrste :
  - Fizičko nagrivanje
  - Hemijsko nagrivanje
  - Nagrivanje reaktivnim jonima (RIE)
  - Duboko nagrivanje reaktivnim jonima (DRIE)



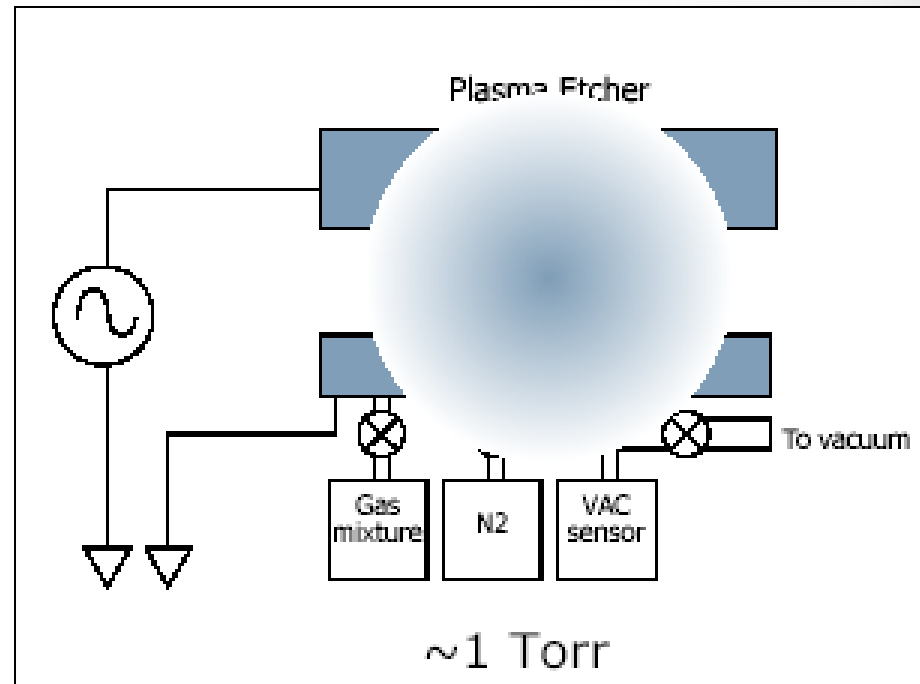
# Plazma

- Plazma je delimično jonizovani gas koji sadrži jednak broj pozitivnog (jone) i negativnog (elektrone) naelektrisanja i određen broj neutralnih (nejonizovanih) molekula
- Uporedo sa jonizacijom molekula (formiranjem parova jon-elektron) odvija se rekombinacija naelektrisanja
- Tipična kinetička energija elektrona u plazmi je 2-8 eV



# Formiranje plazme

- Iz komore se evakuiše vazduh a zatim napuni potrebnim gasovima
- Elektrode se priključe na RF napajanje
- Električno polje ubrzava elektrone povećavajući njihovu kinetičku energiju
- Elektroni se sudaraju sa neutralnim molekulima gasa i kada nastaju joni i još veći broj elektrona
- Ravnoteža (plazma) se uspostavlja pri jonizacija=rekombinacija





# Fizičko plazma-nagrivanje

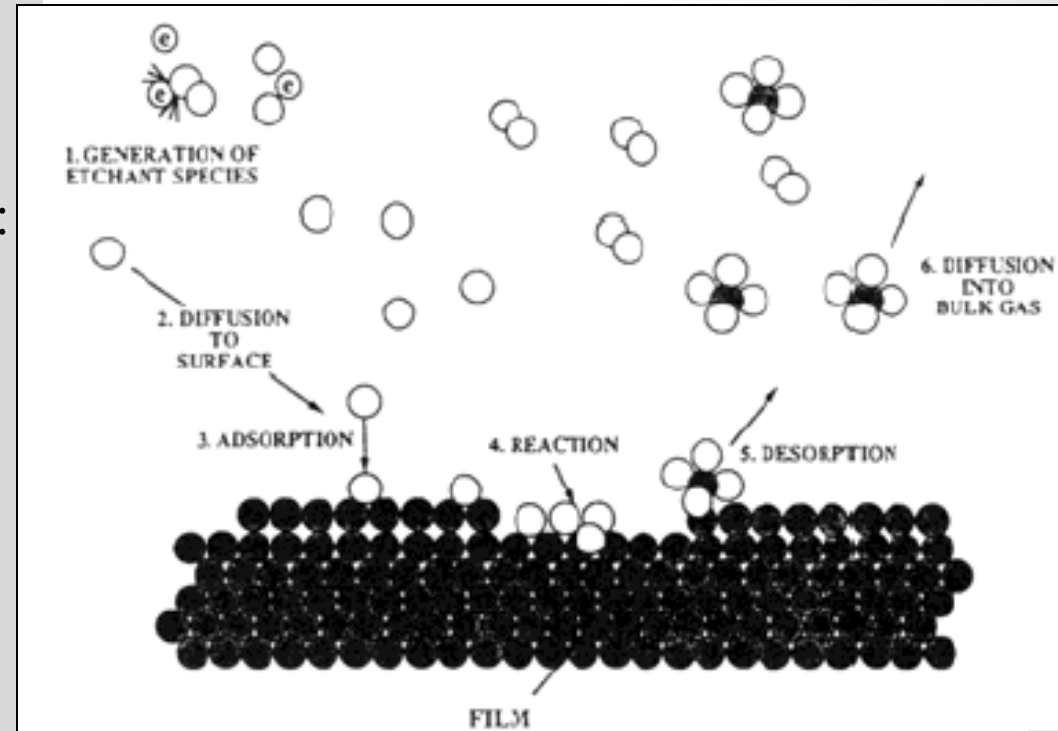
- Bazira se na fizičkom bombardovanju jona ili atoma
- Plazma se koristi za energizaciju hemijski inertnih čestica kako bi velikim brzinama udarale u supstrat
- Pri udaru čestice predaju energiju atomima supstrata
- Ukoliko je ta energija veća od energije veze atomi supstrata se dislociraju
- Nagrivanje je anizotropno
- Kao izvor jona najčešće se koristi Ar





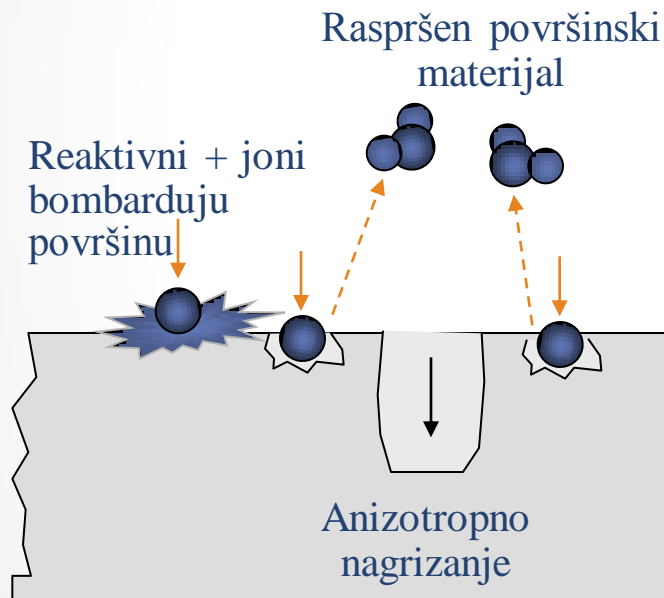
# Hemijsko plazma-nagrivanje

- Plazma se koristi za stvaranje hemijski reaktivnih čestica (atoma, radikala i jona) iz inertnog molekularnog gasa
- Nagrivanje se odvija u 6 koraka:
  - Generacija reaktivnih čestica (npr. slobodnih radikala)
  - Difuzija do površine
  - Adsorpcija na površini
  - Hemijska reakcija
  - Desorpcija produkata reakcije
  - Difuzija produkata

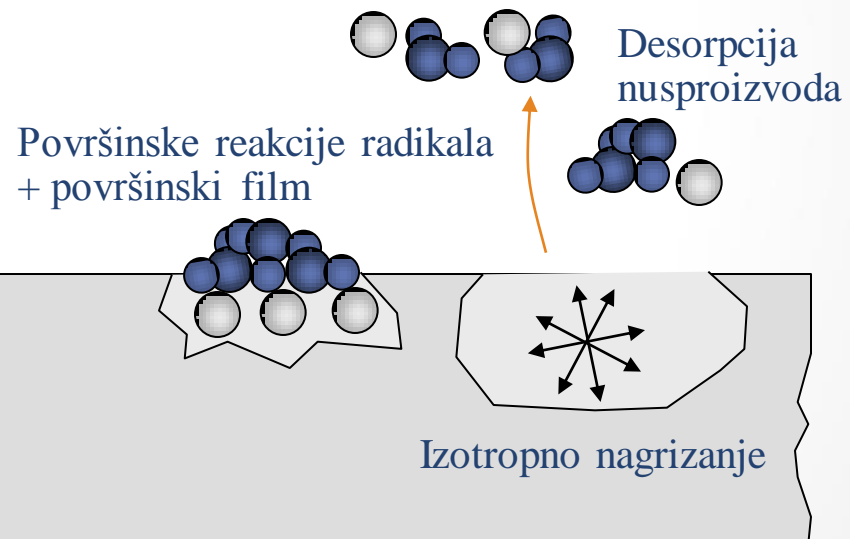


# Mehanizmi hemijskog i fizičkog suvog nagrizanja

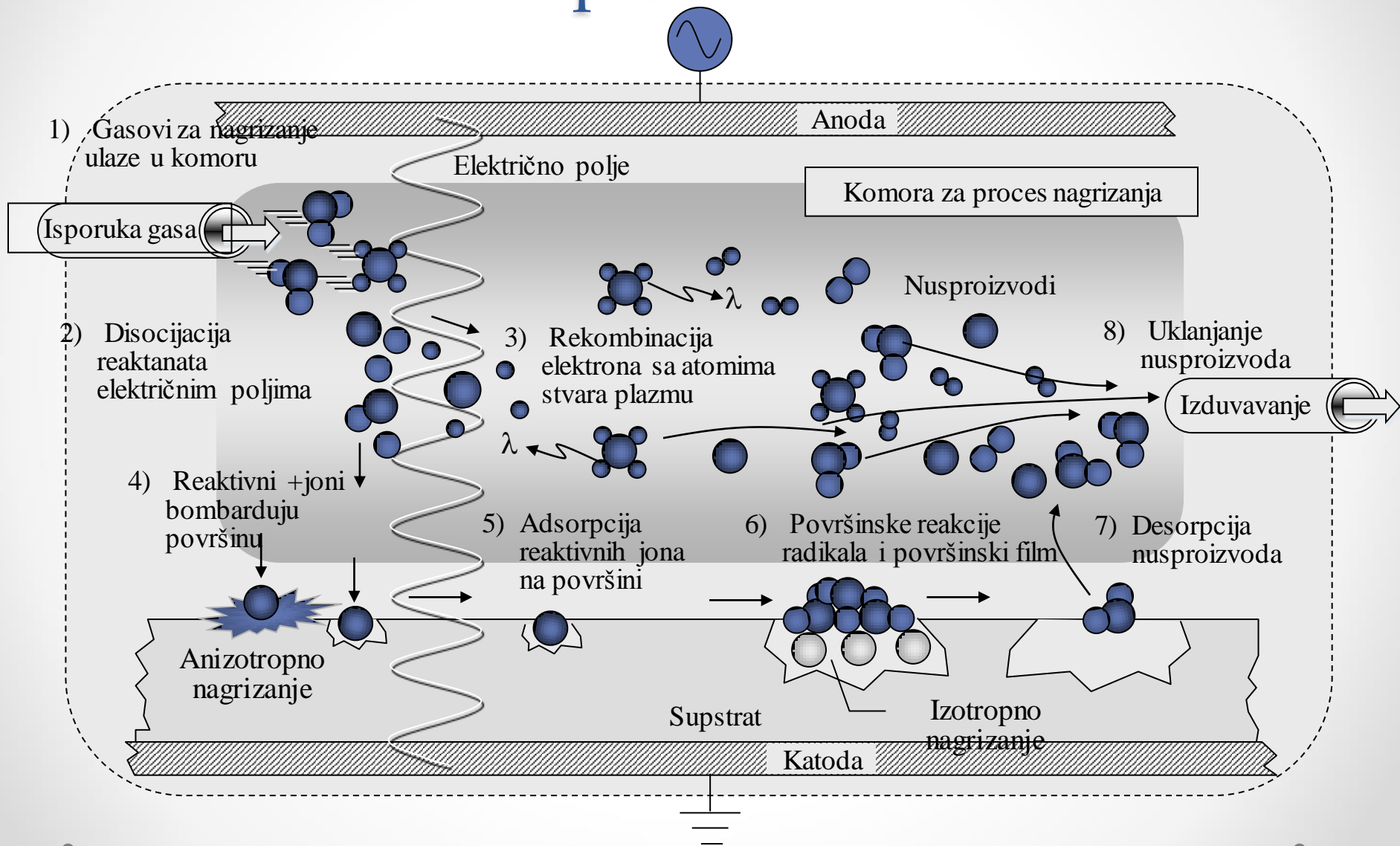
## Fizičko nagrizanje



## Hemijsko nagrizanje



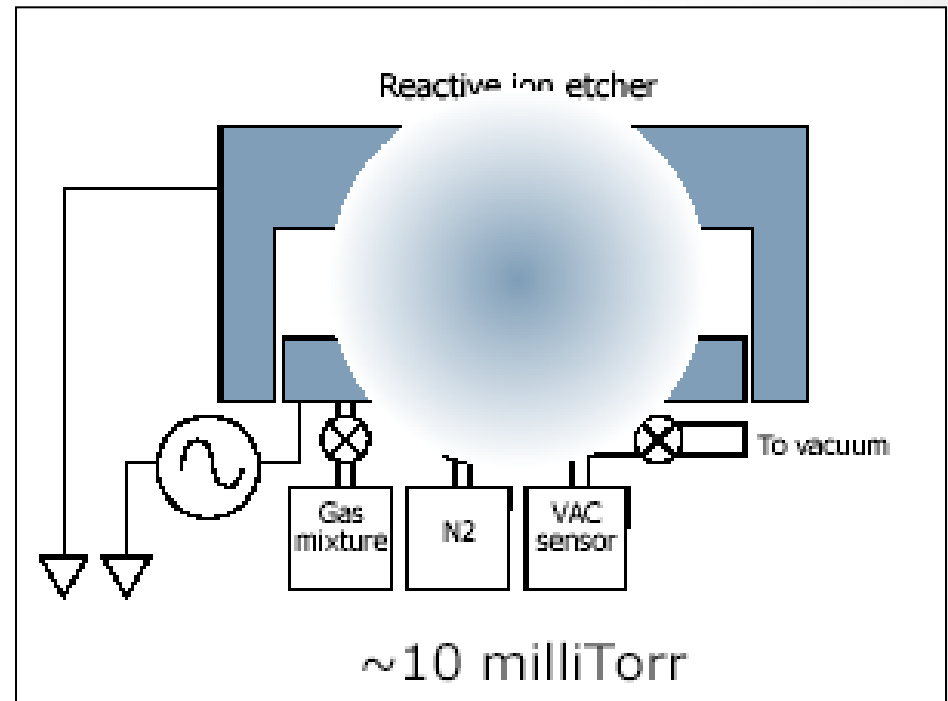
# Plazma proces nagrizanja silicijumske pločice



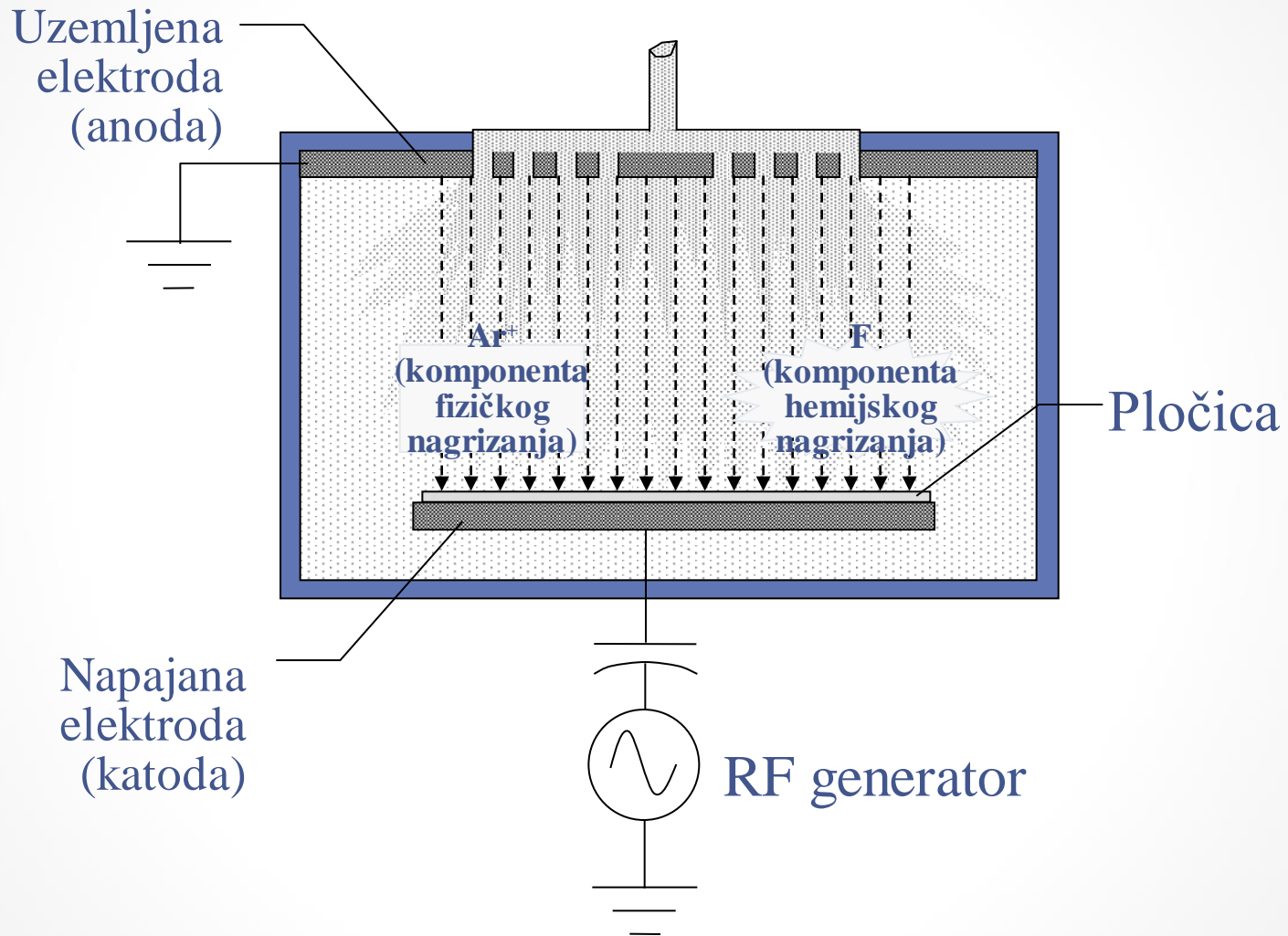


# Nagrivanje reaktivnim jonima (RIE)

- RIE je kombinacija fizičkog i hemijskog plazma-nagrivanja
- Proces u kome se hemijsko nagrivanje vrši zajedno sa bombardovanjem jona
- Bombardovanje otvara oblasti za obavljanje hemijskih reakcija
- Osobine:
  - Ne postoji podećovanje jer boćne strane nisu izloćene
  - Veća brzina nagrivanja
  - Manja selektivnost



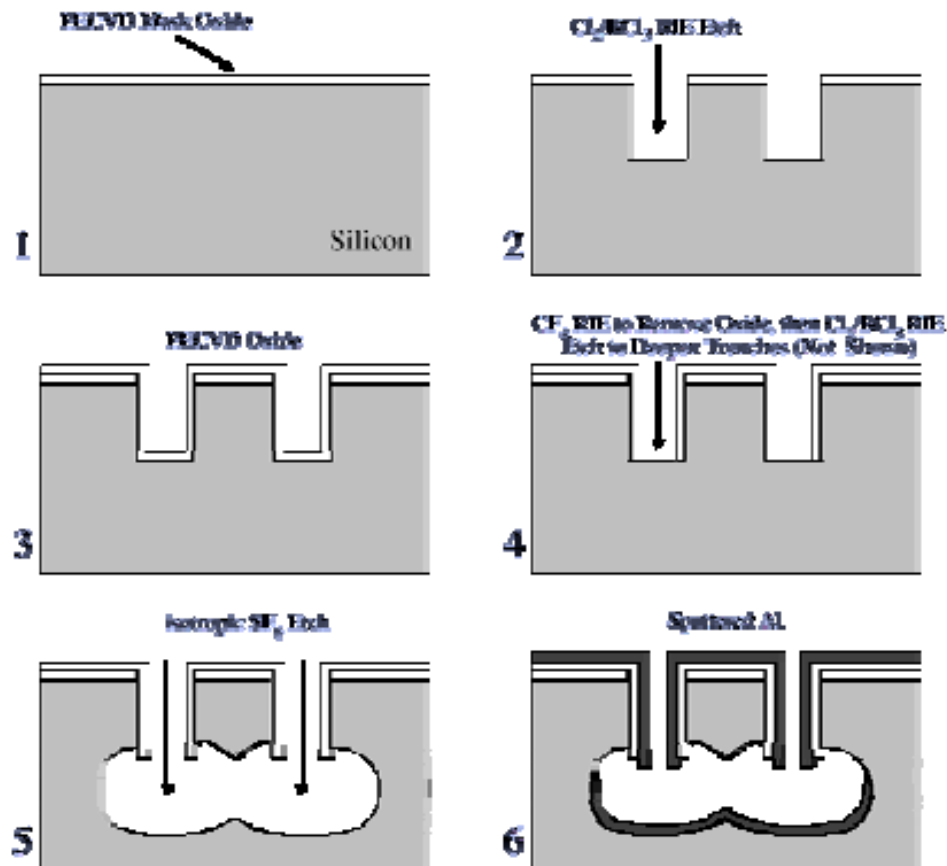
# Paralelni pločasti RIE reaktor





# Primer RIE nagrivanja

- **SCREAM proces** (Single Crystal Reactive Etching And Metallization)
  - Višestruko anizotropno i izotropno suvo nagrizanje
  - Niskotemperaturno nagrizanje i depozicija

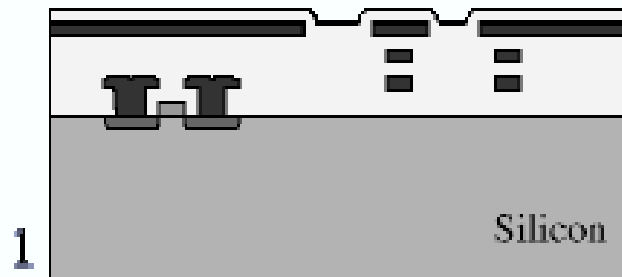




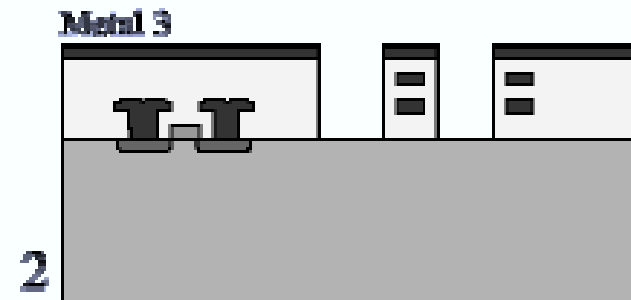
# Primer RIE nagrivanja

RIE nagrivanje posle CMOS procesiranja za oslobađanje strukture tankih filмова

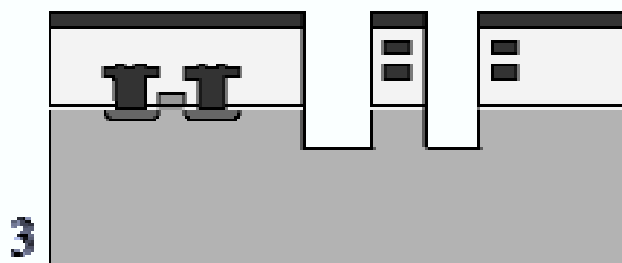
Pre-Fabricated CMOS (3-Level Al)



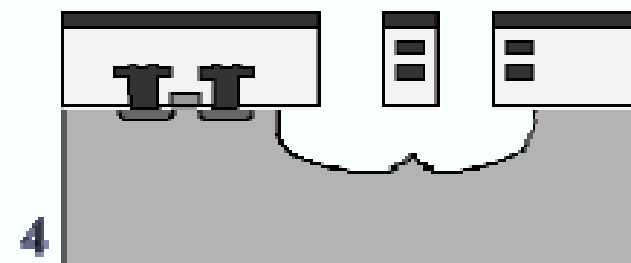
Anisotropic  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  RIE Etch



Anisotropic  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  RIE Etch



Isotropic  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  RIE Etch





# Duboko nagrivanje reaktivnim jonima (DRIE)

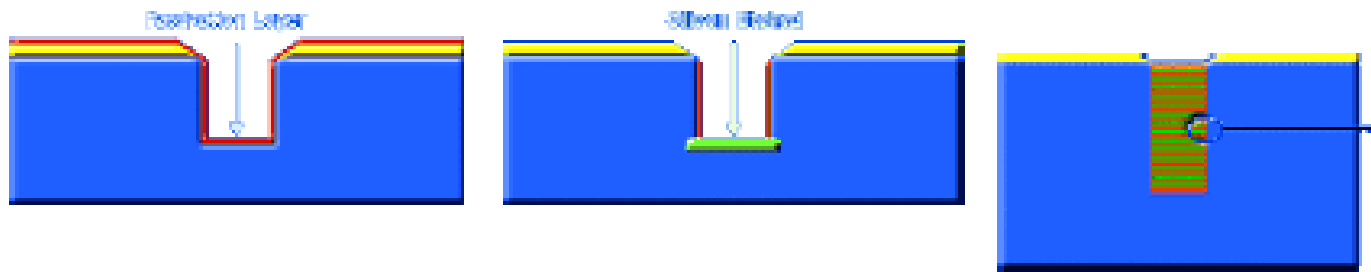
- Primenjuje se magnetno polje za poboljšanje transfera energije rezonirajućih elektrona
- DRIE proces koristi jone manjih energija, što ima za posledicu manja oštećenja i bolju selektivnost materijala
- Gustina reaktivnih jona i njihova kinetička energija kontrolišu se odvojeno





# Primer DRIE nagrivanja

- **Bosch-ov proces** – kombinacija DRIE nagrivanja i postupaka pasivizacije
  - Koristi plazmu velike gustine za naizmenično nagrivanje Si i depoziciju polimera (otpornih na nagrivanje) na bočnim stranama



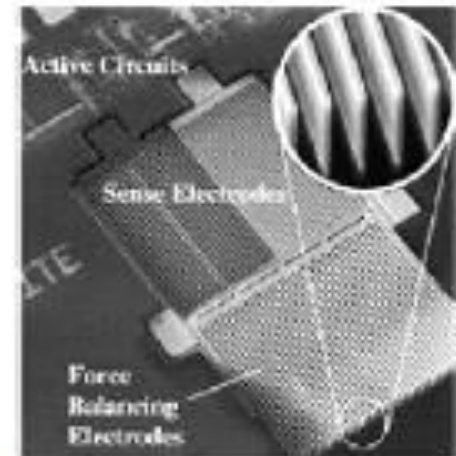
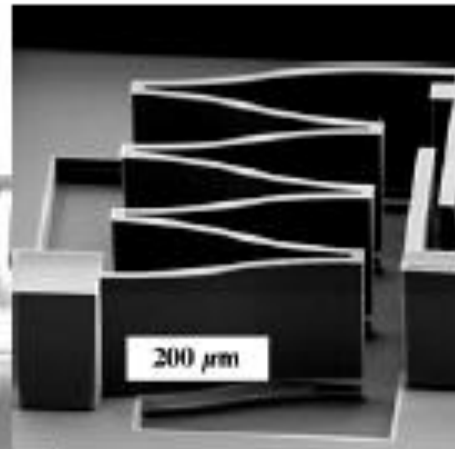
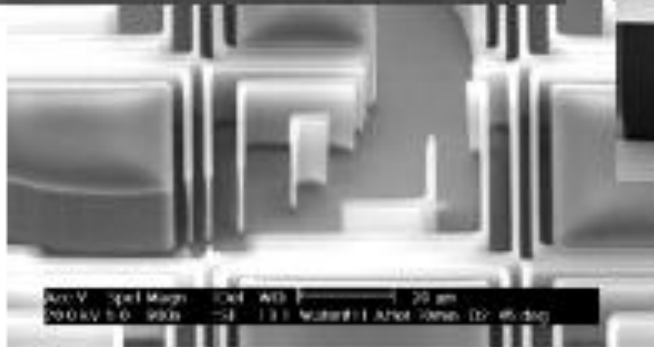
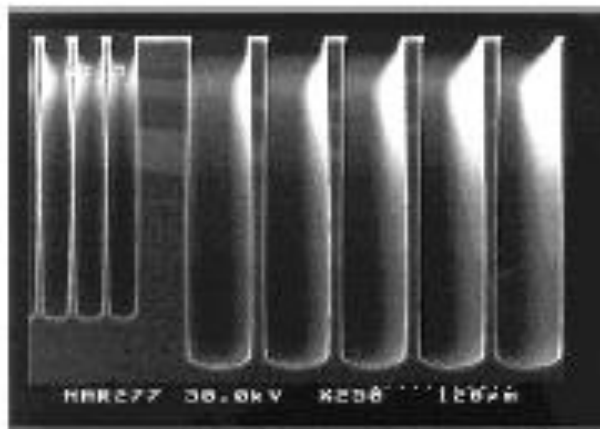
Plasma reaction  $C_4F_8 + e^- \Rightarrow CF_x^+ + CF_x^+ + F^+ + e^-$

Passivation layer deposition  $CF_x^+ \Rightarrow nCF_2$  (fluorocarbon polymer)

Polymer etch  $nCF_2 + F^+ \rightarrow CF_x^+ \Rightarrow CF_2$  (gas)

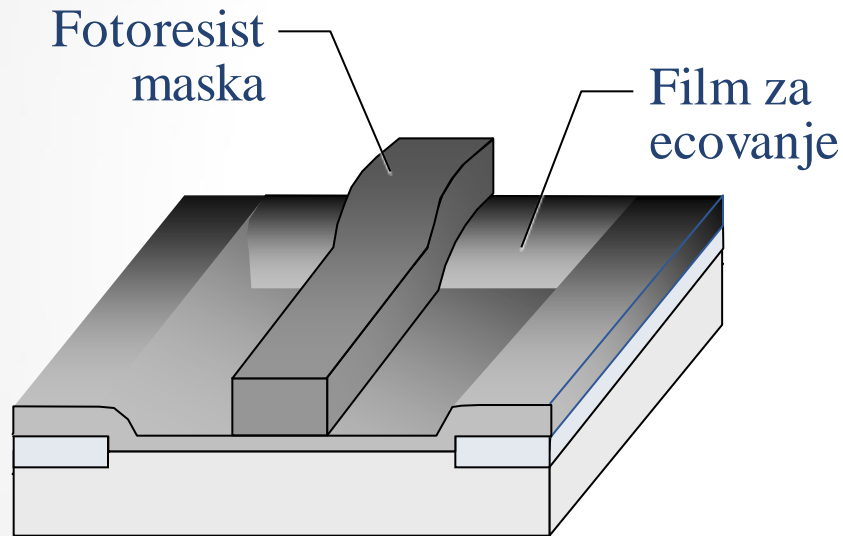


# Primeri struktura realizovanih Bosch-ovim procesom

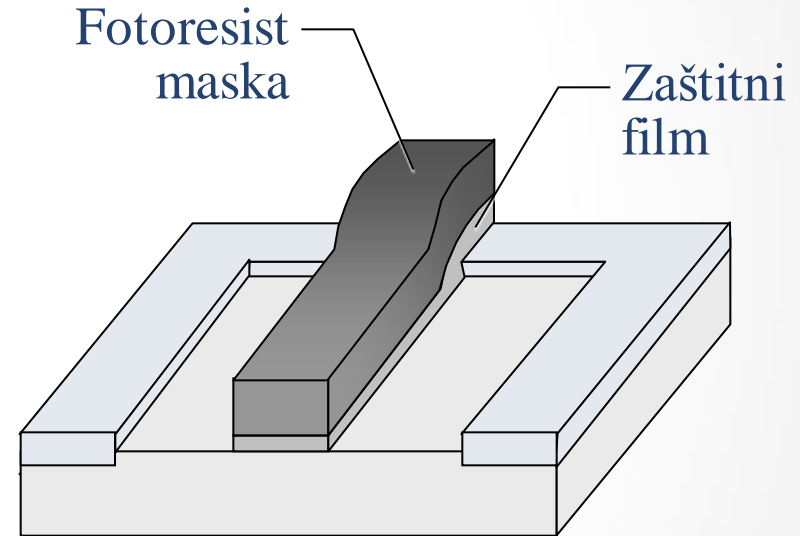


High aspect ratio etches are possible.

# Aplikacije za nagrivanje pločica u CMOS tehnologiji



(a) Podloga sa uzorkom fotorezista



(b) Podloga nakon nagrivanja