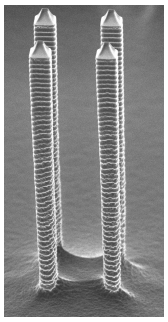
Száraz marások



Pongrácz Anita
2010. Április

Marások szerepe a mikrotechnológiában

Cél: mintázat/3D struktúra kialakítása

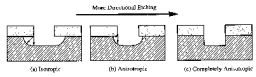


Figure 10–3 Etch profiles for different degrees of anisotropic, or directional, etching: (a) purely isotropic etching; (b) anisotropic etching; (c) completely anisotropic etching.

Nedves marás	**Száraz marás**
- Folyékony marószer	-Gáz fázisú marószerbôl plazma
- Kémiai folyamat	-Kémiai és fizikai folyamat

Si nedves kémiai marása: HNO_3 + HF elegyében (HNO_3 részlegesen NO_2-vé bomlik)

(1) $Si + 2NO_2 + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + H_2 + 2HNO_2$

(2) $Si + HNO_3 + 6HF \rightarrow H_2SiF_6 + HNO_2 + H_2O + H_2$

Si száraz marása: halogén alapú plazmákban

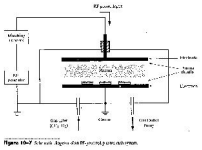
$Si+4F \rightarrow SiF_4$

Plazma marás

Plazma marások jellemzői I.

Plasma Glow

- Alacsony gáz nyomás (1 mtorr-1 torr)
- Nagy elektromos teret kapcsolunk az elektródákra, 13.56 MHz RF
- Gáz atomok egy része ionizálódik : e^- + ionok – plasma glow – vezető gáz (ionok, szabad gyökök, elektronok, semleges részek), a gyorsan mozgó elektronok gerjesztik a részecskéket – ezek relaxálódnak – fotont bocsátanak ki



Plazma marások jellemzői II.

Elektrosztatikus plazma burok (SHEATH)

Plazmával kölcsönhatásba lépő elektróda/fal csak a közvetlen környezetében módosítja a plazmát
A plazma egy árnyékoló burkot képez (tfh. Nem turbulens/nincsenek nagy áramok)

- Debye árnyékolási hossz – a plazma sheath karakterisztikus hossza

- Az $\mu_e >> \mu_{ion}$ – az elektródákon több e^- veszik el, mint ion – **pozitív** többlettöltés alakul ki a plazmában az elektródokhoz képest – **V_p plasma potential**
- A plazma fényes része és a fal között van a sötét terület : elektron hiányos terület, nincs gerjesztés, ez határozza meg a bombázó ion energia és irány eloszlását is
- Az e- hiány miatt a seath-nek nagyobb az impedanciája, mint a plazma glow-nak, - **A feszültség esés a seath-en keresztül történik**
- Asszimmetrikus elektróda elrendezés esetén sokkal nagyobb a feszültségesés a kisebb elektróda felé – fenn kell tartani az áramok kontinuitását

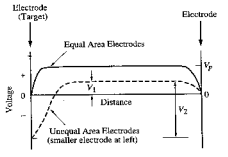


Figure 10–8 Steady-state voltage distribution in RF-powered plasma etch systems. (See Figure 9–27 and the associated text for a more complete discussion of this figure.)

Marási mechanizmusok

MEMS Laboratory

Marási mechanizmusok

☺ Hatékonyabb **kémiai** marás reaktív gyökök jelenlétében (pl. atomos F)
☺ Irányított anizotróp **fizikai** marás töltött részecskékkel (sűrűbb struktúra)

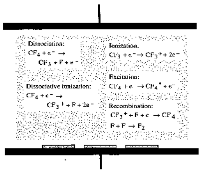


Figure 10–9 Typical reactions and species present in a plasma used for plasma etching.

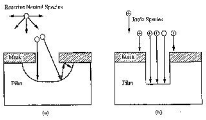


Figure 10–11 Fluxes of species in plasma etching: (a) fluxes of reactive neutral chemical species (such as free radicals), with a wide arrival angle distribution and low sticking coefficient; (b) fluxes of ionic species, with a narrow, vertical arrival angle distribution and high sticking coefficient (assumed equal to 1).

Ion-segített marás

MEMS Laboratory

Kémiai marás

- Szabad gyökök (semleges, nemkötő elektronpárral rendelkezik) – igen reaktív

$$CF_4 + e^- \rightarrow CF_3 + F + e^-$$
$$4F + Si \rightarrow SiF_4$$

A reakcióterméknek **el kell távoznia** a felületrôl, hogy a marás folytatódhason - volatile

Adalék gázok segíthetik a több reaktív szabad gyök képzôdést, ezzel növelhetjük a marási sebességet

pl. O_2 gáz a disszociált CF_3, CF_2-vel reagál, ezzel megakadályozza a rekombinálódást CF_4-gyé, ezzel növeli a szabad F jelenlétét DE: túl sok O_2 túlságosan felhigítja a maró gázt!

- Izotróp a marás, mert
  - Izotróp a sebesség szögeloszlása
  - Alacsony a felületi tapadási együttható (rengeteget barangol, míg reagál, kell neki a megfelelô site, ált. több lépésben zajlik,)
- Nagy szelektivitás érhetô el

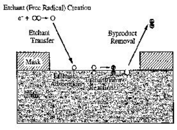


Figure 10–10 Processes involved in chemical etching during plasma etch process.

MEMS Laboratory

Fizikai marás

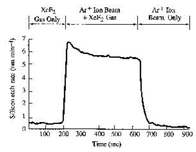
- V_p miatt a pozitív ionok gyorsulnak az elektródák felé (az egyiken ül a szelet is)
- Anizotróp:
  - Az elektromos tér irányítottsága miatt a beérkező ionok irányítottan marnak
  - A tapadási együttható nagy – ha beüt mar, többet nem üt be
- Szelektivitás rossz

MEMS Laboratory

Ion-segített marás

Ionok + semleges szabad gyökök nem függetlenül marnak együtt

- Marási sebesség nem az összeg (sokkal nagyobb)
- Profil nem a lineáris kombináció, hanem olyan, mint a fizikai marás esetén, ha növeljük a kémia komponenst, akkor nem a laterális, hanem a vertikális marási sebesség nő!
- Jó szelektivitás



Magyarázat?

Ionbombázás a kémiai marás vmelyik komponensét segíti (felületi adszorpció, marási reakció, reakciótermék képződés/eltávolítás), de anizotrópan

Pl. hibahelyeken nagyobb valséggel van reakció

Pl. inhibitor anizotróp eltávolítása lsd Bosch

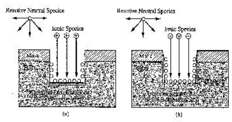
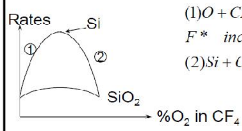


Figure 10–13 Illustration of ion-enhanced etching. In (a) the chemical etch reaction is enhanced by ion bombardment. In (b) an inhibitor is formed which is removed by ion bombardment, allowing chemical etching to proceed. In both cases, anisotropic etching results.

MEMS Laboratory

Példa I. – Si száraz marása

Example: Si etching in CF4+O2 mixture

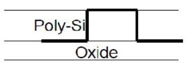


Reason:

$(1) O + CF_x \rightarrow COF_x + F^*$

F^* increases Si etching rate

$(2) Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \therefore rate\downarrow$



EE143 – Vivek Subramanian

MEMS Laboratory

Példa I. – Si száraz marása

Si marása

CF_4 plazma

$CF_4 + e^- \rightarrow CF_3^\bullet + F^\bullet + e^-$ el. ütk. dissz.

$Si + 4F^\bullet \rightarrow SiF_4$ (marás) $CF_3^\bullet + F^\bullet \rightarrow CF_4$ (rekombináció: ez domináns)

$\rightarrow CF_4$ plazmában kicsi a Si marási sebessége.

legyen több $F^\bullet$ → csökkentsük $CF_3^\bullet$-t

$CF_3^\bullet + O_2 \rightarrow COF_2 + OF^\bullet$
$CF_3^\bullet + OF^\bullet \rightarrow COF_2 + 2F^\bullet$
$OF^\bullet + OF^\bullet \rightarrow [O_2F_2] \rightarrow O_2 + 2F^\bullet$

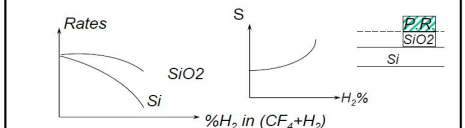
Marógázok: $CF_4 + O_2$ (5-20%), $SF_6 + O_2$, NF_3

Példa II. – SiO_2 száraz marása

How to Control Selectivity ?

$$S = \frac{Rate\ SiO_2}{Rate\ Si}$$

E.g. SiO_2 etching in CF_4+H_2 plasma



Reason:

$F^* + H \rightarrow HF \quad \therefore F^*\ content \downarrow$

$\therefore SiF_4 \downarrow$

EE143 – Vivek Subramanian

Példa II. – SiO_2 száraz marása

SiO_2 marása

$4CF_3^\bullet + 3SiO_2 \rightarrow 3SiF_4 + 2CO + 2CO_2$

$CF_3^\bullet$ kell → csökkentsük $F^\bullet$-t

$2F^\bullet + H_2 \rightarrow 2HF$ stabil

CF_x (x=1-3) + $SiO_2 \rightarrow SiF_4 + CO + CO_2 + COF_2$

CF_x (x=1-3) + Si → Si Fx + C ($C_xSi_yF_z$- polimer → marás leáll)

Marógázok: CF_4 +H_2, CHF_3, C_2F_6 + H_2, C_3F_8 + H_2

Berendezések

Plazma maró berendezések I. – Hengeres plazmamaró

- A szelet nem az elektródán ül, de sok elfér benne
- Izotróp kémiai marás, nagy szelektivitás, kis hibakeltés
- Egyenletlen kívülről befelé haladva
- p=10-1000mtor

Nem kritikus marási lépésekhez
pl. reziszt eltávolítás O_2-ben (ashing)

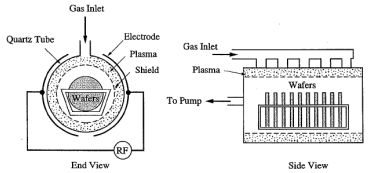


Figure 10–15 Schematic illustration of barrel etch system, in which purely chemical plasma etching occurs.

Plazma maró berendezések II. – Sík plazmamaró

- Sík plazmamaró - Plazma mód
  - A szelet a földelt elektródán ül a másik felé nézve – egyenletesebb marás, főként kémiai, jó szelektivitással, enyhe anizotrópia
  - Ion bombázás is van, de nagyon gyenge, a feszültség esés 10-100V
  - A kisebbik elektróda porlódik
  - p=10-500mtorr
  - ionkoncentráció ~ 10^9-10^{10}cm^{-3}

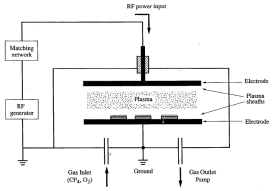


Figure 10–7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

Plazma maró berendezések III. – RIE

- Sík plazmamaró – RIE (Reactive Ion Etching) mód
  - A szelet a kisebbik elektródán ül, gyakran csak egy szelet
  - A nagyobbik a földelt elektróda, csatlakoztatva a kamra falához, jelentősebb a feszültség esés 100-800V tartományban - bias f (p, gázösszetétel, P) - ion segített anizotróp marás lehetséges
  - kisebb nyomás esetén még irányítottabb a marás, de kisebb a plazma sűrűség is (10-100 mtorr), ionkoncentráció ~ 10^9-10^{10} cm^{-3}
  - kis marási sebesség 100 nm/perc
  - Rácshibák, töltődés, árkok (trenching)

Példák:
SiO_2: CHF_3
poli-Si, Si_3N_4: SF_6+ O_2, NF_3
Al: Cl_2, BCl_3

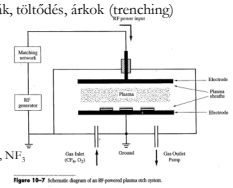


Figure 10–7 Schematic diagram of an RF-powered plasma etch system.

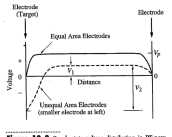


Figure 10–8 Steady-state voltage distribution in RF-powered plasma etch systems. (See Figure 9–27 and the associated text for a more complete discussion of this figure.)

Plazma maró berendezések IV. – HDPE

High Density Plasma Etching

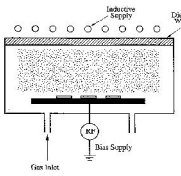


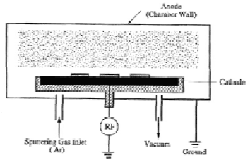
Figure 10–16 Schematic diagram of High-Density Plasma (HDP) etch system. This configuration is powered by an Inductively Coupled Plasma (ICP) source which produces and controls the high-density plasma. The RF wafer bias independently controls the ion energy.

- **Plazma sûrûség** és **Ion energia** egymástól függetlenül
- ECR vagy ICP forrás 10^{11}-10^{12} ion/cm^3 sûrûségû plazmát, nagy sheath bias nélkül - így lehet kisebb nyomásokat használni 1-10 mTorr – még jobban irányított a marás (kevesebb ütközés a sheath-ben)
- RF forrás elôfeszíti a szeletet, ez határozza meg a becsapódó ion energiáját, amit tarthatunk alacsonyan a nagy ionsûrûség mellett is – kisebb szubsztrát károsodás
- nagy marási sebesség: néhány um/min

A hatás olyan, mint az ion segített marásnál!

Plazma maró berendezések V. – Ionmaró

- Porlasztás és ion marás (Sputter etching, Ion milling)
  - Tisztán fizikai marás
  - Kémiailag inert anyaggal (Ar)
  - A szeletek a kisebbik elektródon, az anód a kamra fala
  - Teljesen anizotróp, bmely anyag marható,
  - Az Ar porlasztási hozama hasonló kül. anyagokra - nincs szelektivitás



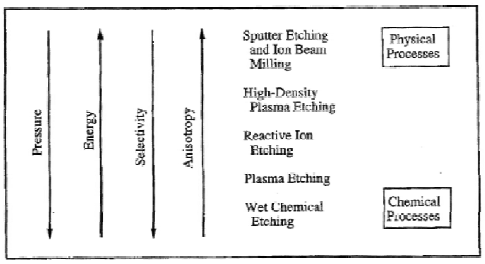


Figure 10–19 Summary of trends of different etch systems.

Az ion bombázás hatásai

- Trenching (árok) – a maszk oldalfaláról lepattanó ionok az alsó sarkot marják
- Redeposition (lerakódás) – a kiporlasztott anyagok a mart területen larakódnak
- Rácshibák keltése – kilök, implantál atomokat a felszín alá
- Radiation damage () – e$^-$ csapdák keltése gate oxidban
- Felület töltődése + image force – a maszk vagy a szelet feltöltődése az ionok eltérüléséhez vezethet

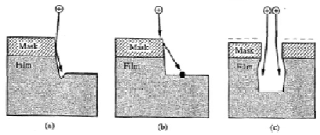


Figure 10–18 Problems associated with sputter etching (or any etching that has a high degree of physical/ionic etching): (a) trenching at bottom of sidewalls; (b) redeposition of photoresist and other material; (c) charging and ion path distortion.

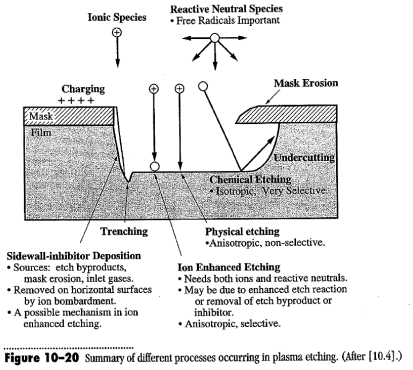
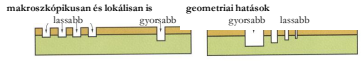
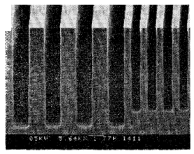


Figure 10–20 Summary of different processes occurring in plasma etching. (After [10.4].)

Terhelési effektus (Loading effect)

- Macroscopic loading: minél több marási felület, annál lassabb marási sebesség (a reaktív gyökök kiürülése miatt, az áramlási sebesség növelésével lehet rajta segíteni)
- Microloading/ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) / RIE lag : a keskenyebb árkokat lasabban marja
  (1) A reaktív gyökök kiürülése, becsapdázódása a mélyben
  (2) Az ionok eltérülése a töltődés miatt
  (3) Árnyékolási effektusok (ha pl. az ionok a sheath-ben ütköznek és off-axis pályára állnak) – ez a nyomás csökkentésével javítható





Overetch step az Endpoint után (10-20%)

MEMS Laboratory

DRIE *Intro*

DRIE – Deep Reactive Ion Etching

Marási mélység : árok szélessége > 10:1 (MEMS, DRAM kapacitások)

Si DRIE

Gáz összetétel: halogén alapú plazmákkal gyors a marás

F-alapú, (pl. SF_6) gyors izotróp marás

Cl-, Br-alapú (pl. Cl_2, HBr) ion segített marással anizotróp, de lassabb és mérgező

F-alapú + inhibitor

Az inhibitor képződés függ: T, kamra előélete!!!

- Hátoldali He gázos hűtés
- LN krioosztátos hűtés -100°C alatt a rekciótermékek inhibitor réteget képeznek
- Két teljesítmény forrás: ICP a nagy reaktív gyök + ion sűrűség képzéshez, CCP DC self-bias az ion energia meghatározásához

MEMS Laboratory

DRIE *Intro – Passziváló réteg kialakítása*

Inhibitor/Passziváló réteg

(1) Si-ot eloxidáló gáz bevezetése, mely nem illékony SiO_xF_y réteget képez

(2) Az illékony passziváló réteg ráfagyasztása (cryo)

(3) Carbon-halogen polymer prekurzor gáz bevezetése

(4) Fém-halogén vagy reziszt erodálása és újra lerakása

Mixed mode DRIE / Cryo

$SF_6 + O_2$ @ cryo °C

Pulsed mode DRIE / Bosch

$SF_6 + C_4F_8$ @ RT

Ion Angular Distribution Image Force…

… hatása a két marási mechanizmusra…

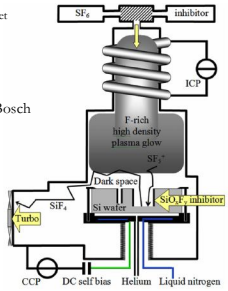


Figure 1. A dual source DRIE system.

MEMS Laboratory

DRIE *Cryo* vs *Bosch*

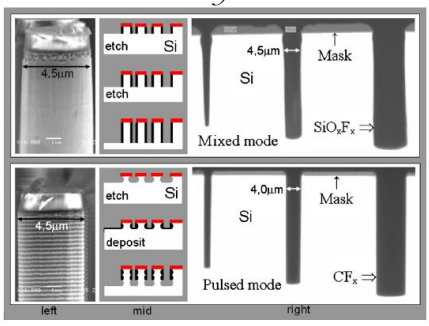
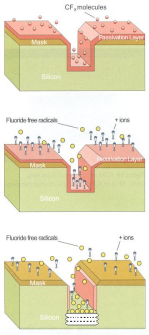


Figure 3. Cross-sectional views of trenches etched in mixed-mode versus pulsed-mode DRIE.

MEMS Laboratory

DRIE – Bosch Process



- Passziválás $C_4F_8 \rightarrow n\,CF_2$ (PTFE)
- Marás $SF_6 \rightarrow F$ + ionok ionbombázás + polimer marás (függőleges falak kivételével)
- SF_6 izotróp - enyhén anizotróp Si marás

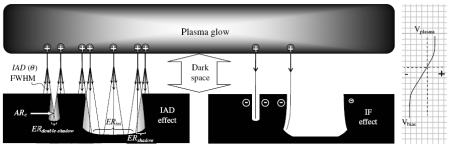


Figure 2. 'Disturbing' features during DRIE processing. Left: ion angular distribution (IAD) caused by ion collisions with species in the dark space. Right: image force (IF) causing negative tapering or bowing in the case of very thin film sidewall protection.

Dark space vastagsága:

$$d = \lambda_D \left(\frac{eU_{sh}}{\frac{1}{2}kT_e} \right)^{3/4} \qquad \lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT_e}{e^2 n_e}}$$

Pl. Ar, d=10 mm @ 1 Pa,

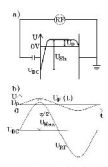
d=6 mm @ 3 Pa

Az ionok gyorsítása itt történik!

SF_6, $d_{\lambda D}/10$

Ütközések a dark space-ben → Ion Angular Distribution Function

→ Ion Energy Distribution Function



Pl. SF_6 @ 10 Pa, 300K (0.2 mm ütközések közötti átlagos szabad úthossz), d_{sh}=0.3 mm → 30° IAD

SF_6 @ 1 Pa, 300K (2 mm ütközések közötti átlagos szabad úthossz), d_{sh}=1 mm → 5° IAD

Szög alatt érkezik – negatív tapering, árnyékolás, RIE lag

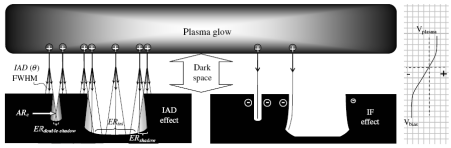


Figure 2. 'Disturbing' features during DRIE processing. Left: ion angular distribution (IAD) caused by ion collisions with species in the dark space. Right: image force (IF) causing negative tapering or bowing in the case of very thin film sidewall protection.

Ionok eltérülése

- Vezető oldalfal negatív potenciálon
- Image Force (képtöltés) – a Si fal elektrosztatikusan vonzza a beérkező ionokat

F~1/√d (minél közelebb van a falhoz annál nagyobb)

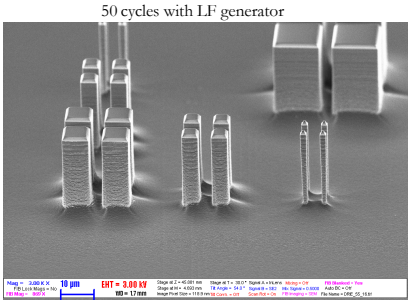
kétoldali hatás, a közelebbi fal felé térül el (keskenyebb árok esetén jobban egyensúlyban van)

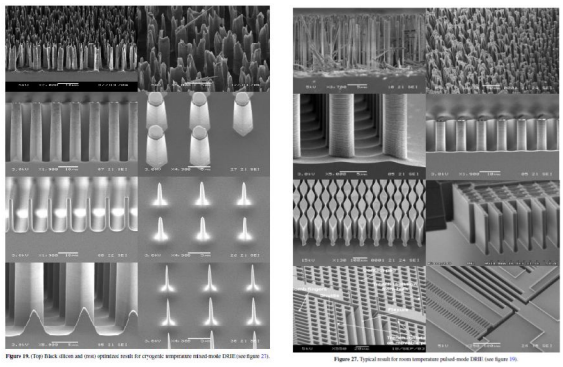
a passziváló rétegben tölt egy kis időt, majd egy e^- nal semlegesítődik, ez függ a passziváló réteg vastagságától! – vastagabb – több időt tölt – ellensúlyozza az IF eltérítő hatását

- Ionok eltérülése miatt az árok alján csökken az ion fluxus – csökken a marási sebesség – RIE lag

Si marás - **Bosch**

C_4F_8 100 sccm, 30 mT, 750W ICP, 5W RF, 4s
SF_6, 150 sccm, 40 mT, 750W ICP, 15W RF, 7s
50 cycles with LF generator





DRIE *Intro - Paraméterfüggések*

RF teljesítmény, ICP teljesítmény, nyomás, gáz összetétel, áramlási sebességek, hőmérséklet (inhibitor desorption!), mennyi a Si felület

Cryo Trends:

SF_6 flow: Increase flow to increase silicon etch rate.
O_2 flow: Adjust oxygen flow to control etch profile and surface roughness. Too much O_2 will give a positive sidewall slope and a rough, 'grassy' surface. Too little O_2 will give an undercut profile.
ICP power: Increase power to increase silicon etch rate, beware of undercutting the mask.
RF power: Reduce to improve selectivity.
Pressure: Adjust pressure to control etch profile and etch rate. Increased pressure will increase etch rate and selectivity, but profile is then typically more difficult to control (as it is more sensitive to O_2 flow and wafer temperature). Decreased pressure will give more vertical profile, but will give lower etch rate and selectivity.
Temp.: Higher temperature will give more undercut, lower temperature will give positive profiles and grassy/rougher surface. Lower temperature (<=120°C) can also give crystallographic etch features at bottom of trenches. It is essential that the wafer temperature is well controlled, i.e. the back of the wafer and electrode surface must be clean, smooth and free from particles, or resist residues.
He BP: Must be high enough to ensure sufficient heat transfer from the backside of the wafer, but should not be so high that it causes wafer to bow or causes excessive Helium leakage (e.g. >10-15sccm leakage is usually considered too high). Also, the wafer must be well clamped by the clamping mechanism, i.e. cannot be moved by hand when clamped.

Bosch Trends

Process	Deposition Process					Etch Process				
Increasing Parameter	C_4F_8 flow	Pressure	ICP	DC bias	Step time	SF_6 flow	Pressure	ICP	DC bias	Step time
Silicon etchrate	-	optimum pressure depends on ICP power	↑↑	↑↓	↓	↑	Pressure depends on ICP power	↑↑	↑	↑
PR etchrate	-		↑↑	↑↓	↓	-	↓↓	↑↑	↑	↑
Oxide etchrate	-		↑↑	↑↓	↓	-	↓↓	↑↑	↑	↑
Profile	↑ (more +ve)	↑ (more +ve)	↓↓ (more -ve)	↑ (more +ve)	↑ (more +ve)	↓ (more -ve)		↓↓ (more -ve)	↑ (more +ve)	↑ (more +ve)
Sidewall roughness	↓	↓	↑	↑↓	↑ (increased 'rippling')	↑	↑	↑	↑	↑ (increased 'rippling')
Surface roughness	needs correct dep/etch time ratio & sufficient ion density/energy				↑	- could be related to ceramic ICP tube surface quality				↓
Etchrate uniformity	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓
Profile uniformity	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓
"Bottling"	↓	No effect	↑	↓	↓	↑	No effect	↑	↓	↑
"Foot"	more polymer dep creates 'trenching' to counteract 'footing'			↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓