

**Công nghệ vi cơ khối
dựa trên ăn mòn khô**

Tại sao phải dùng ăn mòn khô ?

Những ưu điểm của ăn mòn khô:

- Loại bỏ việc xử lý các axit và dung môi nguy hiểm
- Sử dụng một lượng nhỏ hóa chất
- Profile ăn mòn đẳng hướng hoặc dị hướng (thẳng đứng)
- Khắc định hướng mà không sử dụng định hướng tinh thể của Silic
- Truyền đúng mẫu vào các lớp bên dưới (mất ít kích thước đặc trưng)
- Độ phân giải cao và sạch
- Ít ăn mòn ngang
- Điều khiển quá trình ăn mòn tốt hơn

Những nhược điểm của ăn mòn khô:

- Một số khí khá độc và ăn mòn.
- Tái lắng đọng hợp chất không bay hơi trên các đế.
- Thiết bị đắt tiền (\$200-500K for R&D, vài triệu USD cho các hệ thống ăn mòn công nghiệp).

Các dạng ăn mòn khô:

- Non-plasma based - uses spontaneous reaction of appropriate reactive gas mixture.
- Plasma based - uses radio frequency (RF) power to drive chemical reaction.

Ăn mòn khô không sử dụng plasma

Phương pháp này hiếm được sử dụng. Ví dụ:



Although there is a large gain in free energy, the large activation energy does not allow low temperature processes – Phản ứng hiệu quả chỉ trên $\sim 800^\circ\text{C}$.

Để thành công với ăn mòn “gas”, phải phá vỡ trạng thái cân bằng.

Giải pháp là ăn mòn plasma.

One exception is room temperature XeF_2 etching of Si. (same for BrF_3 & ClF_3)

Xenon di-fluoride (XeF_2) etching of Si:



- XeF_2 là một chất bột màu trắng, với áp suất hơi ~ 3.8 Torr ở 25°C .
- Khắc đẳng hướng, ăn mòn không đánh bóng (rough)
- Độ chọn lọc cao đối với Al, SiO_2 , Si_3N_4 , photoresist, and PSG (phospho-silicate glass).
- Tốc độ ăn mòn điển hình $\sim 1\mu\text{m}/\text{min}$
- Nhiệt được tạo ra bởi vì phản ứng tỏa nhiệt
- XeF_2 phản ứng với nước (or vapor) để tạo HF

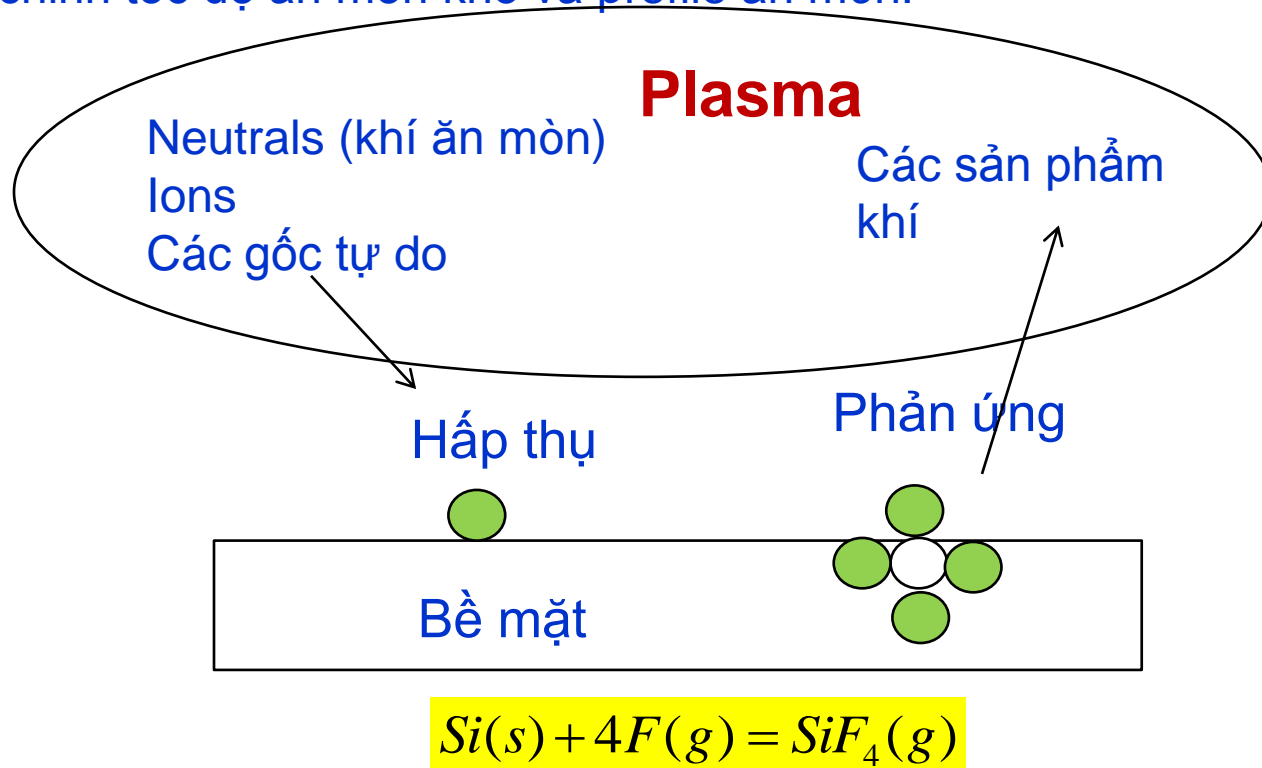
Gas phase etching, no stiction between freed structure and substrate (no liquid involved like KOH etch, so no need of drying that collapses pattern due to capillary force).

Popular for MEMS application.

MEMS: micro electro mechanical systems

Ăn mòn dựa trên plasma

- Khắc trực tiếp do sự có mặt của các loại ion trong plasma và (self-) biased electric field. (The self-bias electric field is not applied *externally*, nhưng được tạo ra đồng thời trong plasma RF)
- Hai thành phần tồn tại trong plasma
 - Các ion dẫn đến sự ăn mòn định hướng.
 - Các phản ứng hóa học dẫn đến độ chọn lọc ăn mòn cao.
- Điều khiển tỷ lệ các thành phần ion /thành phần phản ứng trong plasma có thể điều chỉnh tốc độ ăn mòn khô và profile ăn mòn.

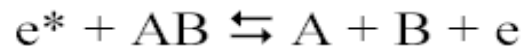


Hóa học plasma RF

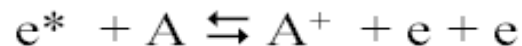
Plasma RF được sử dụng rộng rãi hơn cho ăn mòn khô hơn plasma DC . Plasma DC có ăn mòn khô hay không?

For a plasma with inlet flow of molecule AB, Plasma processes are

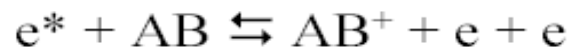
Dissociation



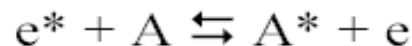
Atomic Ionization



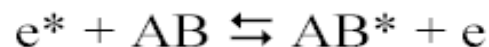
Molecular Ionization



Atomic Excitation

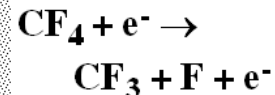


Molecular Excitation

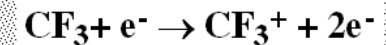


CF₄ plasma

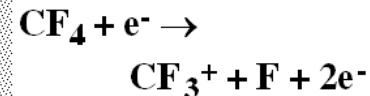
Dissociation:



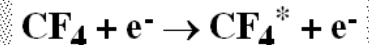
Ionization:



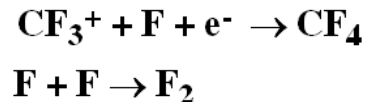
Dissociative ionization:



Excitation:



Recombination:



Là trạng thái thứ tư của vật chất (các trạng thái, thể khác là rắn, lỏng, khí) trong đó các chất bị ion hóa mạnh. Đại bộ phận phân tử hay nguyên tử chỉ còn lại hạt nhân; các electron tách ra chuyển động tương đối tự do giữa các hạt.

Các cơ chế phát sinh và hủy trong plasma

- Trong một plasma, các hạt không ổn định được tạo ra liên tục.
- Nồng độ của các ion, gốc, nguyên tử hoạt động và điện tử tăng cho đến khi tốc độ mất của chúng bằng với tốc độ tạo ra, tạo thành một plasma ở trạng thái ổn định.
- Sự tái hợp các ion và electron: chúng “thu hút” lẫn nhau và bị hủy.
- Trôi, khuếch tán vào tường: các electron bị mất ở bề mặt dẫn điện, thành buồng hoặc điện cực. Các ion bị mất (chuyển thành các hạt trung tính) do tiếp xúc với các bề mặt dẫn điện, đặc biệt là điện cực dương.
- Sự tái hợp của các gốc: e.g. $2O \rightarrow O_2$.
- Phản ứng hóa học (những gì chúng ta muốn): ví dụ: $4F + Si \rightarrow SiF_4$ (gốc flo kết hợp với Silic (Phiến Si) để tạo ra khí tetra-fluoride silicon. Đây là một quá trình ăn mòn khô điển hình.)

In equilibrium, degree of ionization typically 10^{-3} - 10^{-6} , very low, meaning majority gas not ionized.

(plasma density = number of ions/cm³ ~ typically 10^9 - 10^{13} /cm³.)

In a plasma TV, the recombination of ion-electron or radical, or de-excitation of atom or molecule, generates the colorful light we see.

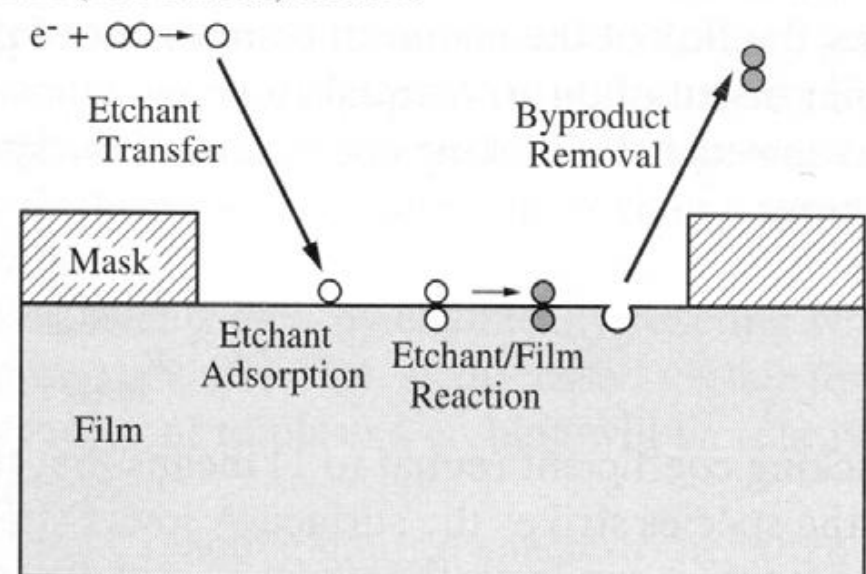
Plasma TV



Các cơ chế ăn mòn plasma

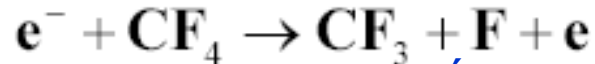
- Trong plasma, các loại chất hóa học trung hòa phản ứng (Các gốc tự do, nguyên tử F hoặc các loại phân tử CF_3) đóng vai trò chính cho phản ứng hóa học bởi số lượng của chúng lớn hơn rất nhiều so với các ion (e.g. CF_3^+ cũng phản ứng, nhưng với nồng độ thấp trong plasma. Nhưng Ar + không phản ứng và ăn mòn / phún xạ chậm hơn nhiều so với ăn mòn hóa học, ngay cả khi năng lượng ion cao - nói chung là ăn mòn hóa học nhanh hơn nhiều so với vật lý).
- Các gốc tự do và các phân tử đóng vai trò là loại lắng đọng chính trong PECVD.
- Những gốc tự do đó có nhiều hơn các ion vì: 1) chúng được tạo ra ở năng lượng ngưỡng thấp hơn (e.g. $< 8eV$; trong khi, Ar bị ion hóa ở $15.7eV$); and 2) chúng (các gốc không tích điện) có thời gian sống lâu hơn trong plasma.
- Các gốc trung tính đến bề mặt cực âm cathode bằng cách khuếch tán (do đó không định hướng).
- Các ion tích điện được gia tốc về cực âm cathode do tự bias.
- (Trừ khi có năng lượng rất cao, $>100eV$ như trong ăn mòn chùm ion / phún xạ), **Bản thân ion không đóng góp đáng kể vào phản ứng hóa học bởi vì nồng độ rất thấp, nhưng sự bắn phá ion có thể tăng cường đáng kể phản ứng hóa học trong quá trình ăn mòn tăng cường ion.**

Etchant (Free Radical) Creation

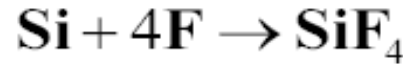


Ăn mòn hóa học: Chọn lọc cao, nhưng đẳng hướng

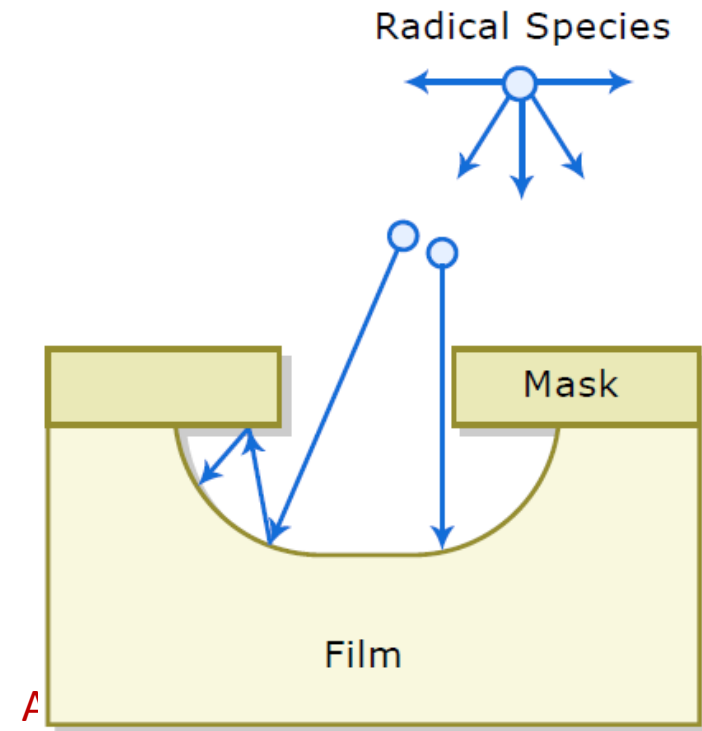
- Do liên kết không hoàn chỉnh (vỏ ngoài không hoàn chỉnh), Các gốc tự do (Trung hòa, e.g. CF_3 và F từ plasma CF_4) là các chất hóa học phản ứng rất mạnh.



- Các gốc tự do phản ứng với màng được khắc và tạo thành các sản phẩm dễ bay hơi.



- Ăn mòn hóa học đơn thuần là đẳng hướng hoặc gần như đẳng hướng, và Profile khắc phụ thuộc vào góc đến và hệ số bám của các gốc tự do.
- Các gốc tự do (không tích điện) trong các hệ thống plasma có góc đến đẳng hướng.
- Hệ số bám dính S rất thấp, điển hình $S \sim 0.01$ (i.e. Hầu hết các gốc tự do hấp thụ sau đó chỉ bật lại mà không có phản ứng).
- Điều này dẫn đến đặc tính đẳng hướng của ăn mòn, vì các gốc tự do có thể khắc vùng bên dưới mặt nạ do phản xạ, như trong hình. Profile ăn mòn có hiệu ứng ăn mòn ngang lớn.



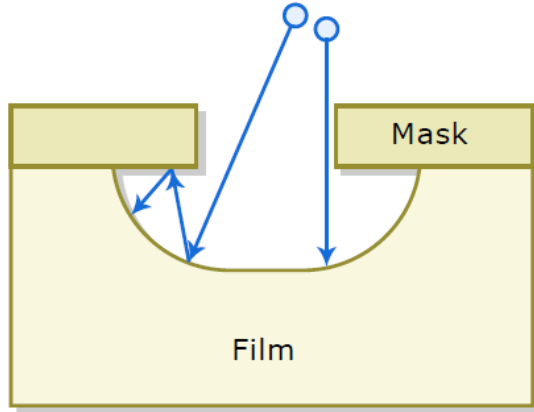
$$\phi = \alpha \frac{1}{4} n \langle v \rangle = \frac{\alpha p}{\sqrt{2\pi m k T}}$$

Hệ số bám dính (Sticking coefficient) S

Radical Species

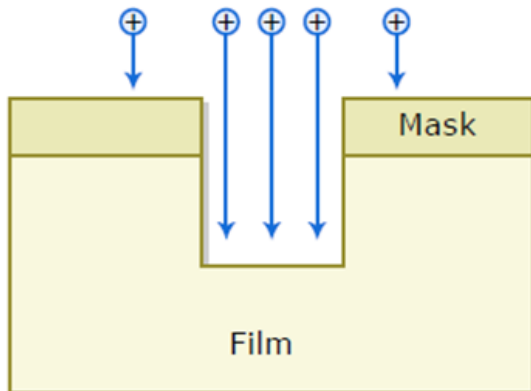


Most adsorbed species just left the adsorption site without doing anything, so $S \ll 1$.



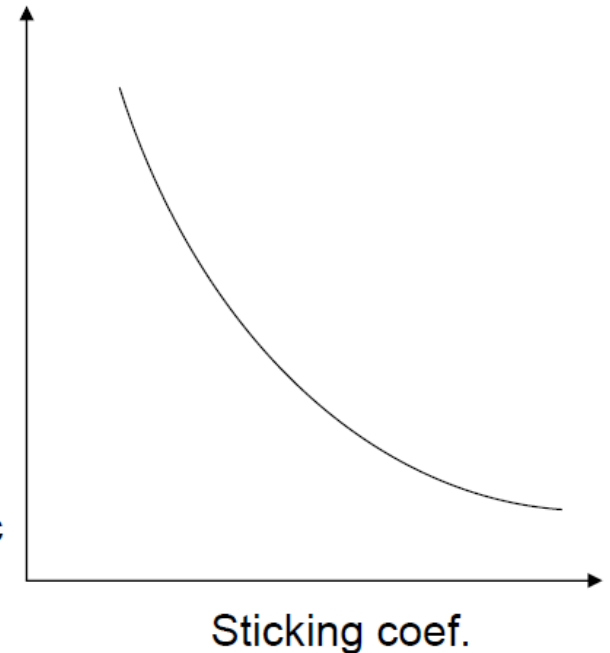
Isotropic
 $S \ll 1$

Ionic Species



Anisotropic
 $S \approx 1$

“Phản ứng”, ở đây truyền động lượng bằng cách bắn phá vật lý, diễn ra ở mỗi lần bắn, thường bắn ra một vài nguyên tử, vì vậy $S \sim 1$.



Sản phẩm phụ ăn mòn nên có điểm sôi thấp

Điểm sôi thấp có nghĩa là rất dễ bay hơi, vì vậy nó có thể được bơm ra khỏi buồng phản ứng.

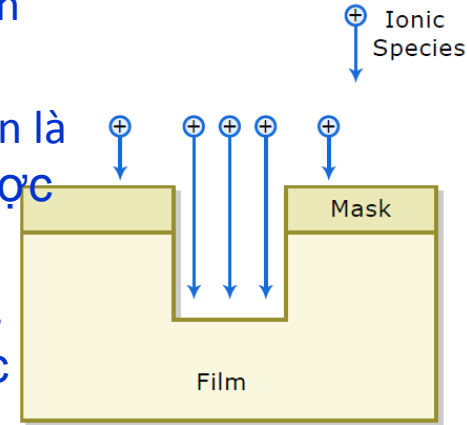
This is not necessary for *physical* etching/sputtering, where etch product is sputtered off that ideally doesn't fall on the other part of the wafer (re-deposition).

Điểm sôi của các sản phẩm ăn mòn điển hình

ELEMENT	CHLORIDES	BOILING POINT (°C)	FLUORIDES	BOILING POINT (°C)
Al	AlCl ₃	177.8 (subl.)	AlF ₃	1291 (subl.)
Cu	CuCl	1490	CuF	1100 (subl.)
Si	SiCl ₄	57.6	SiF ₄	-86
Ti	TiCl ₃	136.4	TiF ₄	284 (subl.)
W	WCl ₆	347	WF ₆	17.5
	WCl ₅	276	WOF ₄	187.5
	WOCl ₄	227.5		

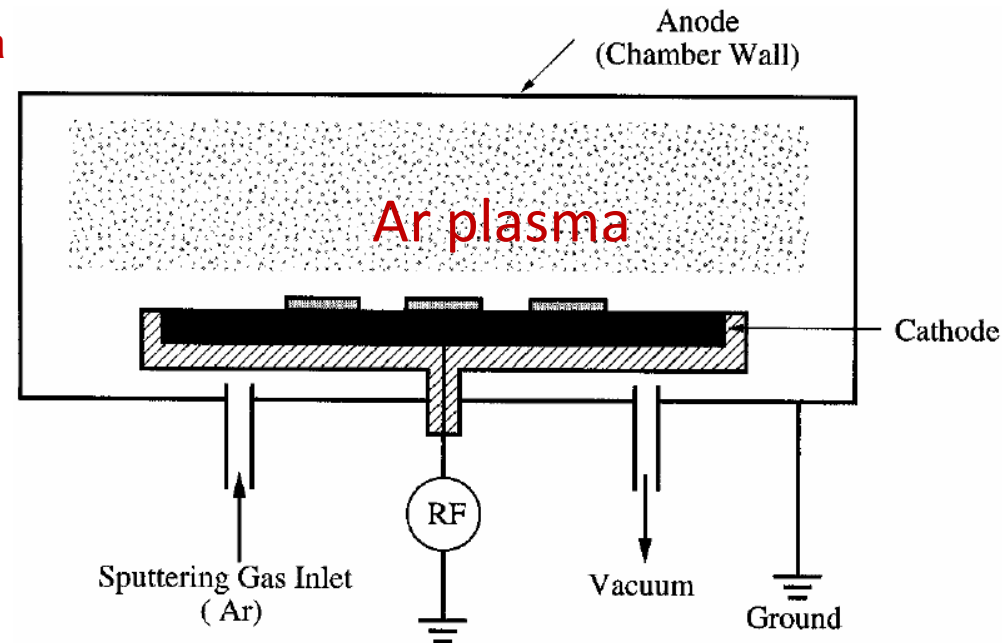
Thành phần ăn mòn vật lý trong một hệ thống ăn mòn plasma (ít quan trọng hơn nhiều so với ăn mòn hóa học)

- Các loài ion được gia tốc về phía mỗi điện cực bởi phân áp tự hình thành.
- Các loại ion như Cl_2^+ , CF_4^+ , CF_3^+ (or Ar^+ trong ăn mòn phun xạ hoàn toàn là theo cơ chế vật lý) va chạm bề mặt phiến và loại bỏ các vật liệu được ăn mòn.
- Directional, non-selective - similar sputter yield for different materials. (Nhưng CF_3^+ cũng có thể ăn mòn hóa học Si, sau đó với tính chọn lọc cao)
- Nó có thể dẫn đến sự tái lắng đọng đáng kể.



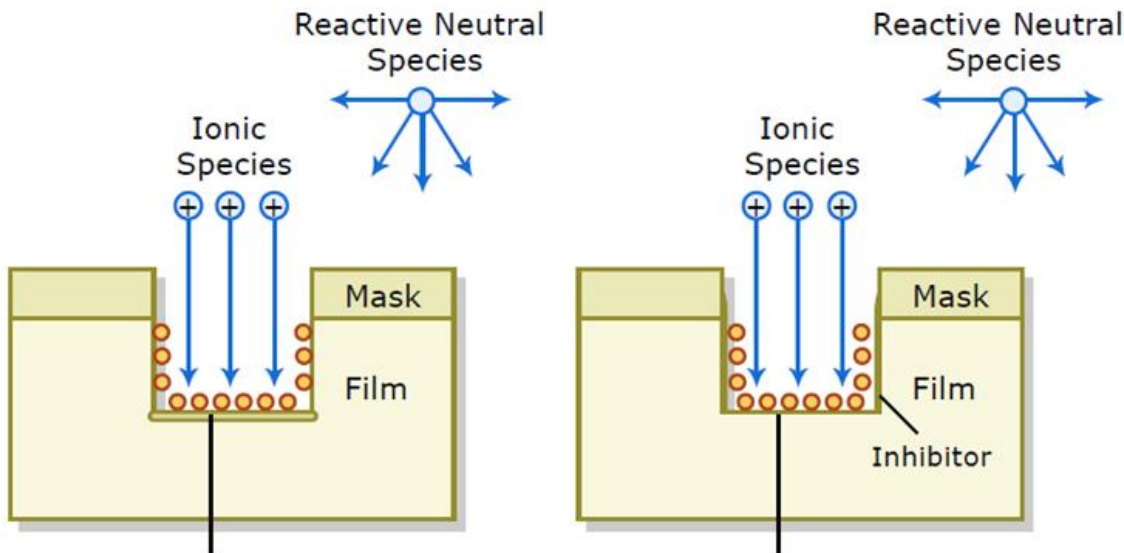
Ăn mòn vật lý thuần túy: hệ thống khắc phun xạ

- Self-bias few 100V, but low ion energy (order 10V) due to collision energy loss.
- Do đó, tốc độ khắc rất thấp trong hệ thống phun xạ, thường chỉ để làm sạch bề mặt.
- Đây là trường hợp cho hệ thống khắc phun xạ với áp suất khí 10mTorr.
- For a dedicated ion milling system (no plasma, see later slides), the pressure is $\sim 10^{-4}$ Torr or even lower (cannot sustain a plasma), leading to large mean free path, high ion energy and high milling rate.



Ăn mòn tăng cường ion (IEE): Ăn mòn hóa học được hỗ trợ bởi bắn phá vật lý

- IEE là dị hướng (do bắn phá ion định hướng) và là quá trình ăn mòn chọn lọc cao (do phản ứng hóa học).
- **Ăn mòn ion phản ứng (RIE)** là dạng phổ biến nhất của IEE.
- Sự bắn phá ion có thể tăng cường một trong các bước sau trong quá trình khắc hóa học: hấp thụ bề mặt, phản ứng ăn mòn (by physically damaging/weakening the chemical bond of the material to be etched), loại bỏ sản phẩm (lớp ức chế), và loại bỏ các chất ăn mòn không phản ứng.



Chemical etch enhanced by ion bombardment

Inhibitor removed by ion bombardment

Inhibitor layer: e.g. fluorocarbon polymer formed from CHF_3 during etching of SiO_2 .

When removal rate \ll deposition rate, net deposition will occur, then the process becomes similar to PECVD!!

Indeed, the RIE and PECVD are pretty similar tools, except PECVD is typically heated.

IEE: bằng chứng đầu tiên của cơ chế khắc

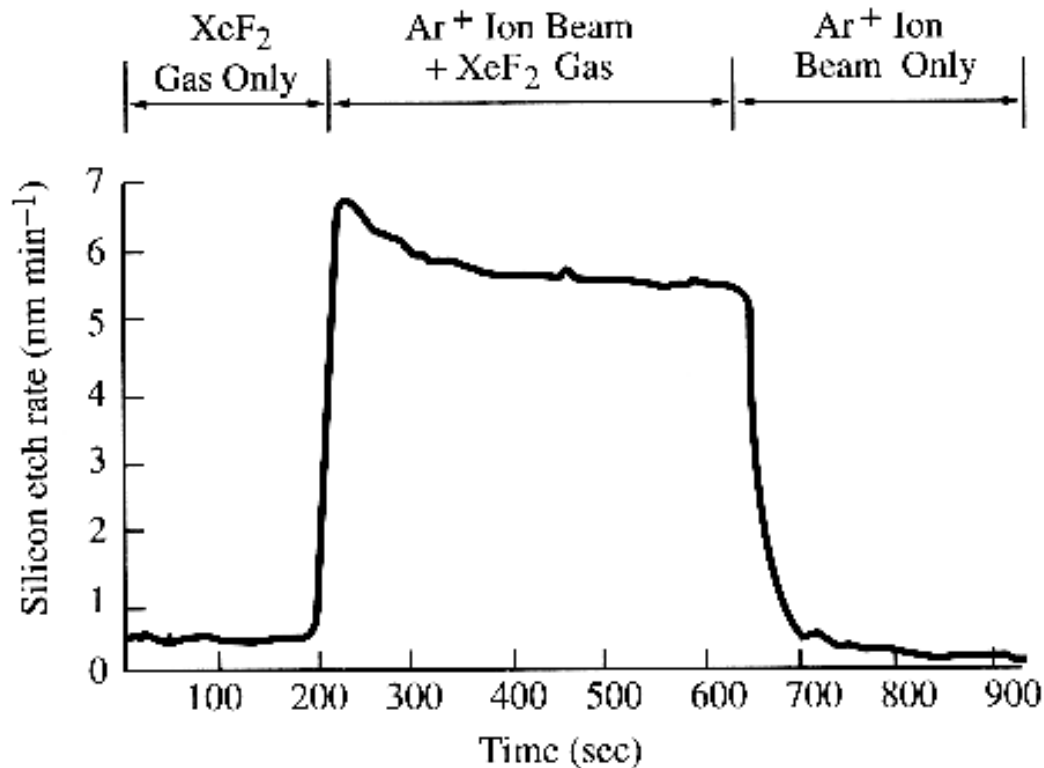


Figure 10-12 Etch rate of silicon as XeF₂ gas (not plasma) and Ar⁺ ions are introduced to the silicon surface. Only when both are present does appreciable etching occur, illustrating synergistic etching behavior between chemical and ionic species. (After [10.5, 10.6].)

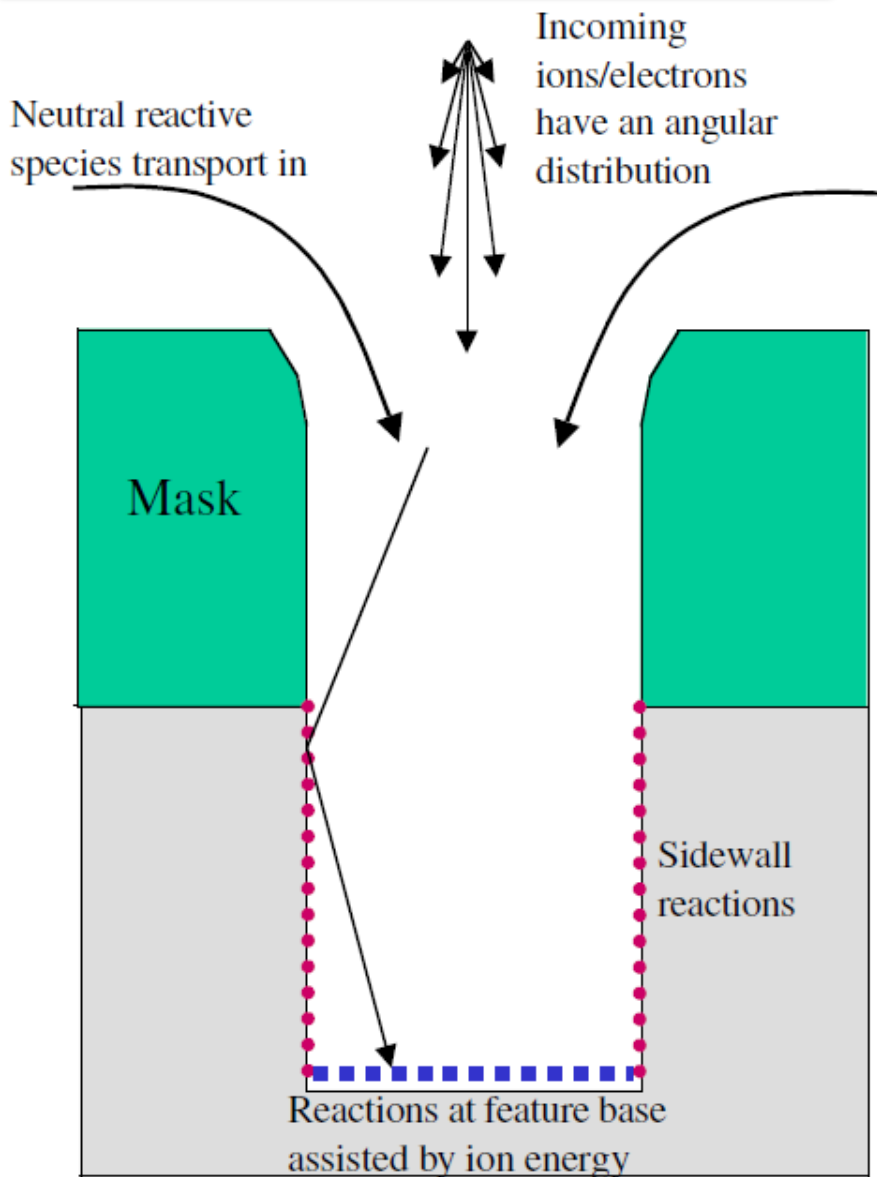
Gas phase etch, with or without the aid of Ar ion beam.
NO plasma.
Very slow etch when pure chemical or physical etch *alone*

Sự tăng cường ion có thể là do sự phá hủy / làm yếu mạng silicon do bắn phá ion, giúp cho việc khắc bằng XeF₂ dễ dàng hơn.

Profile kết quả ăn mòn sẽ là bất đẳng hướng vì các bề mặt nằm ngang bị bắn phá nhiều hơn so với bề mặt thẳng đứng.

This is one example of CAIBE (chemically assisted ion beam etching), see later slides

Khắc tăng cường ion có tính dị hướng cao



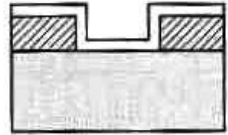
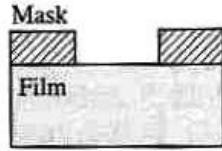
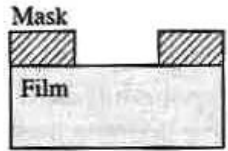
- Sidewall reactions can lead to an isotropic etch component.
- To prevent sidewall etching, one can build up a passivation (inhibitor – inhibit chemical reaction) layer that protects it.
- Then there is a competition between passivating and etching reaction.
- For the feature base/horizontal surfaces, etch rates tend to be temperature independent because of ion energy input (i.e. inhibitor sputtered away by ions).
- On sidewall, substrate temperature can play an important role as sidewall passivation depends on the volatility of the inhibitor that is controlled by temperature (cryo-etcher at below -100°C is available recently, then the sidewall passivation layer is not volatile).
- Even without sidewall passivation, lower temperature still increases anisotropy since chemical attack of sidewall is suppressed at low temperature. (Attack of horizontal surfaces are assisted by ion bombardment)

Tốc độ lắng đọng
chất ức chế (thụ động
hóa bề mặt) cao

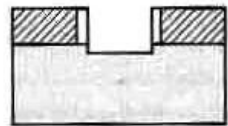
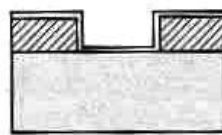
Tốc độ lắng đọng
chất ức chế thấp

Ví dụ:

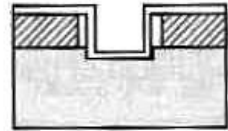
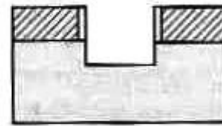
Profile ăn mòn của Si hoặc SiO₂



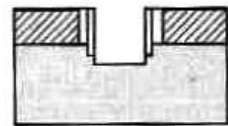
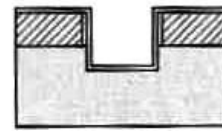
Inhibitor
Deposition
or Formation



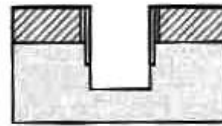
Etch



Inhibitor
Deposition
or Formation

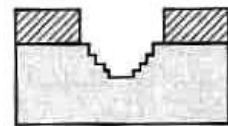


Etch

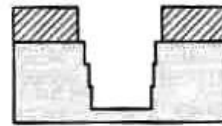


⋮

⋮



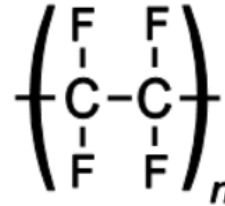
Final
Profile



a. Inhibitor deposition rate
fast compared to etch rate

b. Inhibitor deposition rate relatively
slow compared to etch rate

Teflon

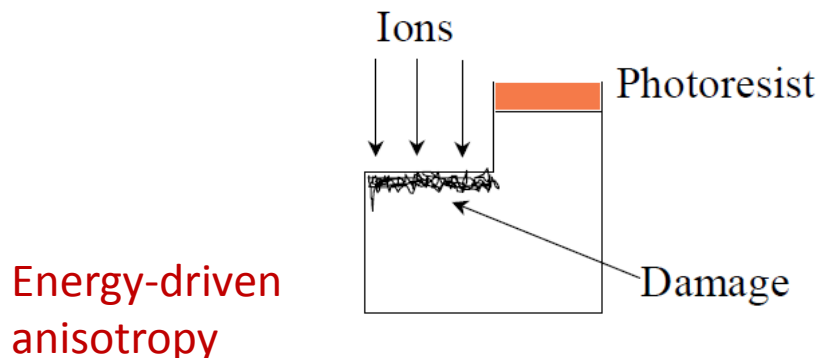


- Fluoropolymer (like Teflon) in CHF₃ or CF₄+H₂ RIE of Si or SiO₂ is the inhibitor.
- Nếu khí Ar được thêm vào, chất ức chế chủ yếu được loại bỏ bằng cách bắn phá ion. Vì vậy, ít tấn công của chất ức chế lên mặt bên cấu trúc ăn mòn.
- Nếu khí O₂ được thêm vào, chất ức chế ở thành bên được loại bỏ với tốc độ nhanh hơn ion Ar, nhưng sự ăn mòn của chất ức chế ở bề mặt ngang thậm chí còn nhanh hơn.
- Tuy nhiên, ở nhiệt độ rất thấp, chất ức chế SiO_xF_y (không hoạt động như chất ức chế ở nhiệt độ cao khi nó bay hơi) tạo ra khi O₂ được thêm vào, mà nó là cơ chế cho ăn mòn dị hướng nhanh Si khi sử dụng hệ ăn mòn cryo-etcher. (deep Si etcher, popular for MEMS – micro electro mechanical systems)

Dị hướng do bắn phá ion: summary

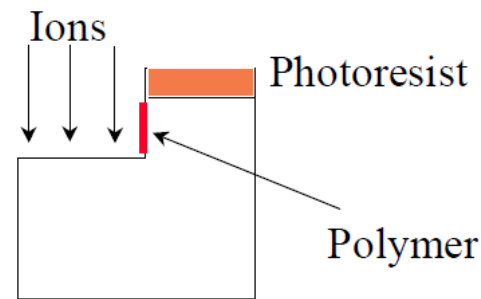
- Due to its extremely low density, ions don't contribute much to etching; neutral radicals do.
- So even with directional ion bombardment, the overall etching can still be pretty isotropic.
- For instance, SF_6 etch of Si is very isotropic with large undercut like wet etch.
- To achieve anisotropy, there are two mechanisms:
 - **Energy-driven anisotropy:** bombardment by ion disrupts an un-reactive substrate and causes damages such as dangling bonds and dislocations, resulting in a substrate more reactive towards etchant species (electron or photon can also induce surface activation).
 - **Inhibitor-driven anisotropy:** ion bombardment removes the inhibitor layer from horizontal surface (sidewall remain passivated), and reaction with neutrals proceed on these un-passivated surfaces only.

One may think that ions won't help much due to its much lower density than radicals. But ion has sticking coefficient $S \sim 1$ (every ion bombardment counts), whereas radicals $S \sim 0.01$ (most radicals hit the surface and left without doing anything).



Energy-driven anisotropy

speeds chemical reaction on horizontal surfaces.



Inhibitor-driven anisotropy

slows chemical reaction on vertical surfaces.

Các dạng hệ thống ăn mòn plasma

Một số dạng hệ thống plasma và một hoạt động đã được phát triển:

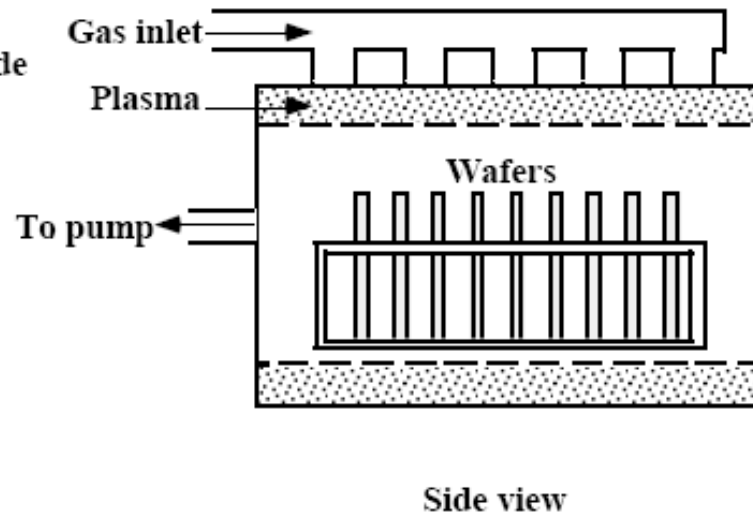
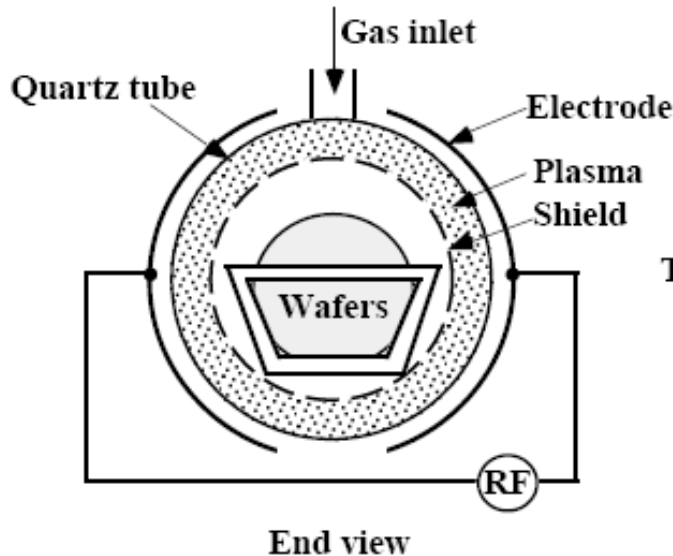
- Các hệ thống dạng buồng khắc (Barrel etchers)
- Hệ thống đĩa song song (Parallel plate systems) (môt plasma)
- Hệ thống đĩa song song (môt ion phản ưng)
- Các hệ thống plasma mật độ cao
- Ăn mòn phún xạ và khắc ion (Sputter etching and ion milling)

Ăn mòn plasma trong các buồng khắc (Plasma etching in barrel etchers)

Quartz tube

Hệ ăn mòn dạng buồng (Barrel etcher):

- Chỉ có ăn mòn hóa học, đẳng hướng và chọn lọc như ăn mòn ướt thuần túy.
- Sử dụng lá chắn plasma để giữ sự bắn phá ion tới các phiến, do đó rất ít sai hỏng.
- Đồng nhất kém từ cạnh tới trung tâm phiến.
- Được sử dụng trong các bước không quan trọng như loại bỏ chất cảm quang bằng plasma O₂ (Barrel “asher” Polymer + O → CO₂ + H₂O).

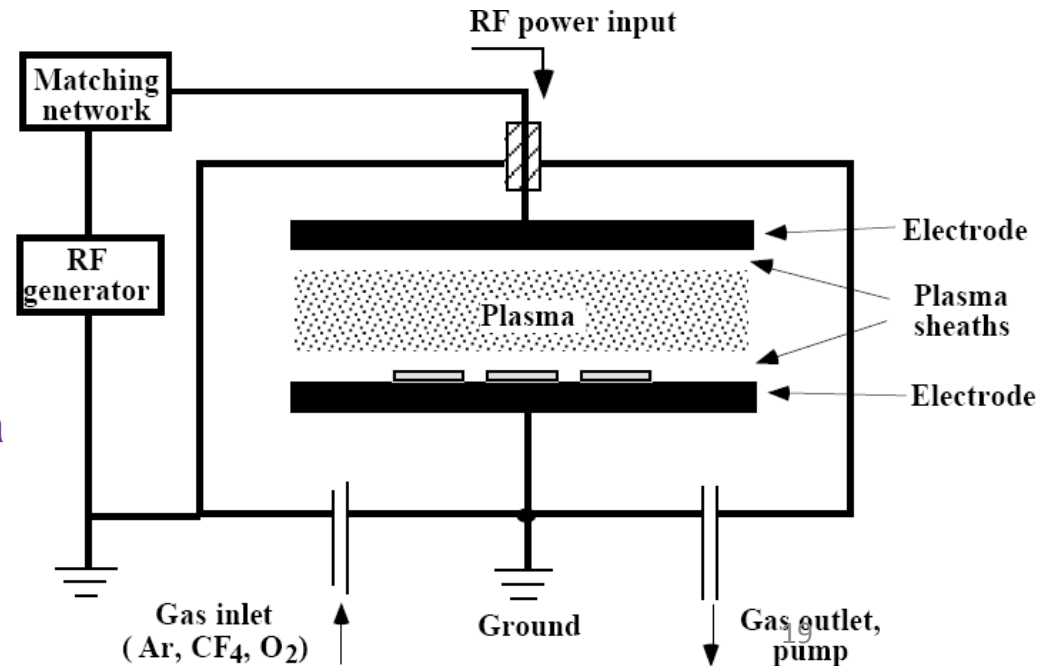


Ăn mòn plasma trong hệ thống đĩa song song – Một plasma

Đĩa song song = Plasma kết cặp điện dung (capacitively coupled plasma (CCP))
You will see later on ICP : Plasma kết cặp cảm ứng (inductively coupled plasma)

- Tương tự PECVD, ngoại trừ: khí ăn mòn được sử dụng thay vì tiền chất khí lỏng đọng tạo màng.
- Điện cực để tương đương hoặc lớn hơn (được nối đất tới buồng) (nó xác định một plasma) dẫn tới kết quả bắn phá ion yếu hơn tới đế (Điện áp DC nhỏ hơn rơi gần điện cực lớn hơn).
- Ăn mòn là đồng nhất hơn so với ăn mòn dạng buồng khác, nhưng điển hình một lúc chỉ ăn mòn một hoặc vài đế (cassette for barrel etcher).
- Cả ăn mòn hóa học và vật lý đều xuất hiện (wafer “in contact” with plasma), mặc dù cơ chế ăn mòn sau là yếu, đặc biệt ở áp suất cao hơn khi sự sụt giảm điện áp DC gần đế là nhỏ hơn.
- Ăn mòn là dị hướng và chọn lọc vì cơ chế ăn mòn hóa học mạnh.

- Thường, ăn mòn một plasma được xem như chỉ là một loại ăn mòn ion phản ứng (RIE), nhưng được thực hiện ở áp suất lớn hơn.
- Tất nhiên: cả ăn mòn một plasma và RIE là ăn mòn plasma.

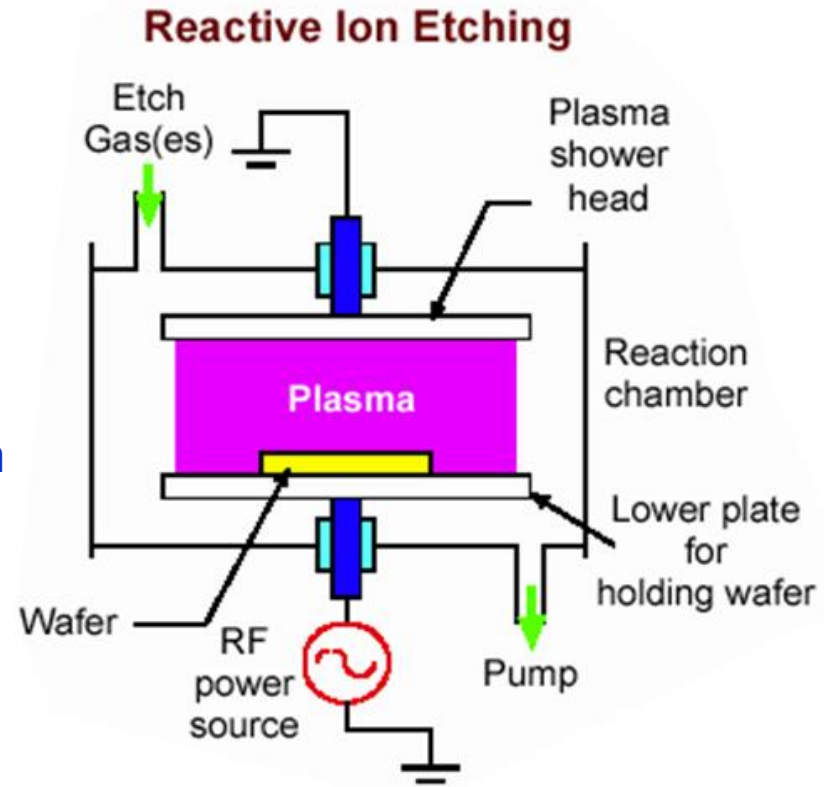


Ăn mòn đĩa song song (RIE thông thường, Plasma mật độ thấp)

- Đây là dạng ăn mòn khô quan trọng nhất, mặc dù gần đây ICP đang ngày càng phổ biến (chi tiết ở phần sau).
- So với một plasma: điện cực để nhỏ hơn (Điện cực counter được nối tới thành buồng ăn mòn), Áp suất thấp (<100mTorr), bắn phá ăn mòn theo cơ chế vật lý nhiều hơn (sụt điện áp nhiều: 100V).
- Cơ chế ăn mòn tăng cường ion, (thường) định hướng/dị hướng và chọn lọc.

RIE khi sử dụng lắp đặt đĩa song song là mật độ plasma thấp (ions $10^8 - 10^{10}/\text{cm}^3$), như vậy tốc độ ăn mòn thấp.

Ở đây, plasma (ion) mật độ thấp cũng ngụ ý mật độ thấp của các gốc tự do. Như vậy tốc độ ăn mòn thấp.

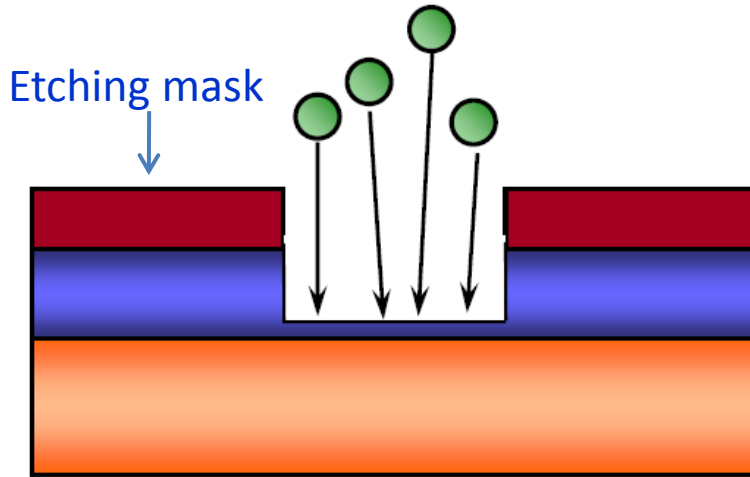


At a pressure of 20 mT the plasma consist of

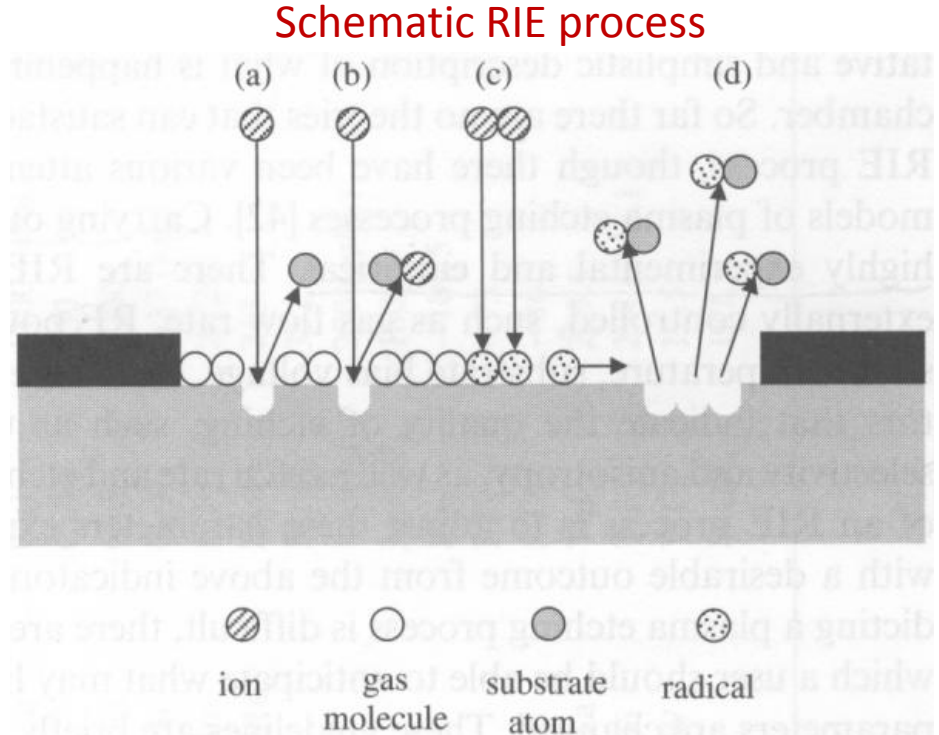
Neutral Species	10^{15} cm^{-3}
Reactive Neutral Species	$10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
Ions and Electrons	$10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

VERY roughly, one can say that plasma consists of order 1% radicals (reactive neutral species) and 0.01% ions.

Ăn mòn ion phản ứng (Reactive ion etch (RIE))



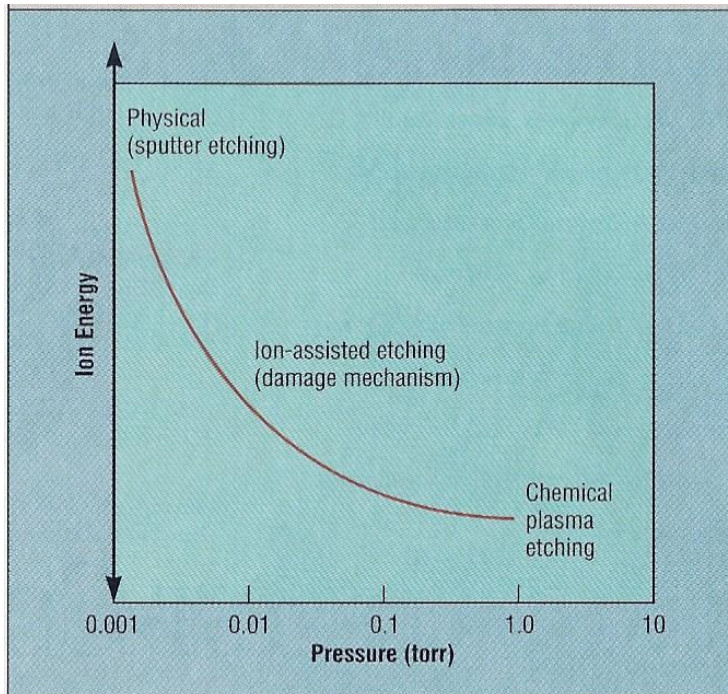
- Bởi vì tính dị hướng và chọn lọc đồng thời, RIE được sử dụng nhiều.
- Hoạt động cho hầu hết các chất bán dẫn và điện môi.
- OK for few metals that form volatile etch products: Al (form AlCl_3), Cu (CuCl_2) (not really), Ti (TiF_4 , TiCl_4), W (WF_6), Cr (CrO_2Cl_2).



a) Phún xạ ion, b) ăn mòn ion phản ứng, c) tạo gốc (?), d) ăn mòn (quan trọng nhất)

In RIE, ion energy is low (several 10s eV, \ll voltage drop near wafer surface, due to collision energy loss), and its number density is very low, thus negligible etching by ion bombardment. The name reactive “ion” etching is very misleading since ions don’t contribute *directly* to etching – it just “helps” chemical etching.

Năng lượng ion và áp suất đối với một plasma



Ion Energy vs. Pressure for a plasma.

- Lower pressure (<10mTorr) increases mean free path as well as voltage drop near wafer electrode, both of which leads to more energetic and directional ion bombardment, thus more anisotropic, but less selective and slower etching rate due to low ion/free radicals density.
- High pressure (>100mTorr), short mean free path, low voltage drop, isotropic chemical etching.
- Thus it is desirable to have a low pressure plasma with high ion density.

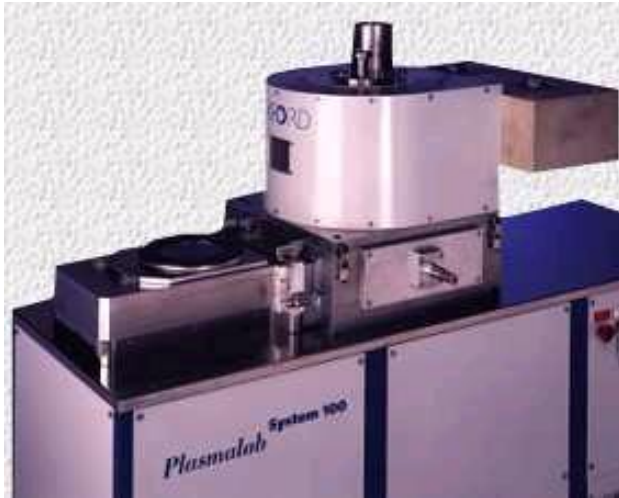
Plasma mode: >100mTorr

RIE mode: 10-100mTorr

Sputter etching: pressure as low as possible, as long as plasma can be sustained, but still very slow etching rate.

RIE with tilted wafer, will etch vertically or not?

Electron cyclotron resonance (ECR) and inductively coupled plasma (ICP)



ECR was introduced in 1985.

ICP was introduced much later (1991- 1995).

Dual plasma source:

Top one (ECR or ICP RF power) generates HDP, determines ion density/current.

Bottom one (CCP RF power) generates bias voltage like regular RIE, determines ion energy.

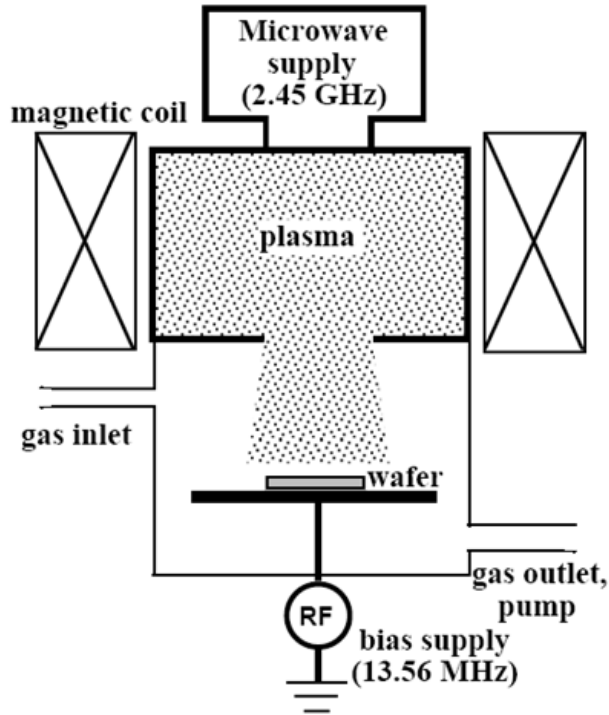
Typical parameters for HDP and conventional plasma etcher

Parameters	RF Etcher	HDP Etcher
Pressure (mT)	50~1000	0.5~50
Plasma Density (cm ⁻³) ions/cm ³	10 ⁹ ~10 ¹¹	10 ¹⁰ ~10 ¹²
Ion Energy (eV) should be lower	200~1000	<i>Controllable</i> 20~500
Ion Current Density (mA/cm ²)	0.1~2	1~20
Electron Temperature (eV)	1~5	2~7
Ionization rate	10 ⁻⁶ ~10 ⁻³	10 ⁻⁴ ~10 ⁻¹

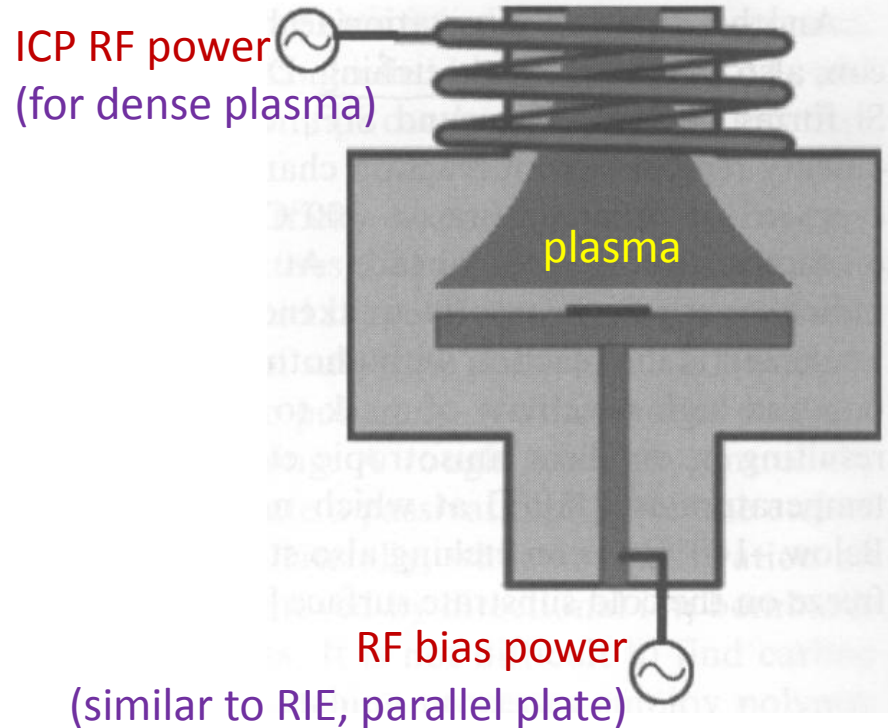
CCP: capacitively coupled plasma, parallel plate, used for conventional regular RIE.

ECR and ICP

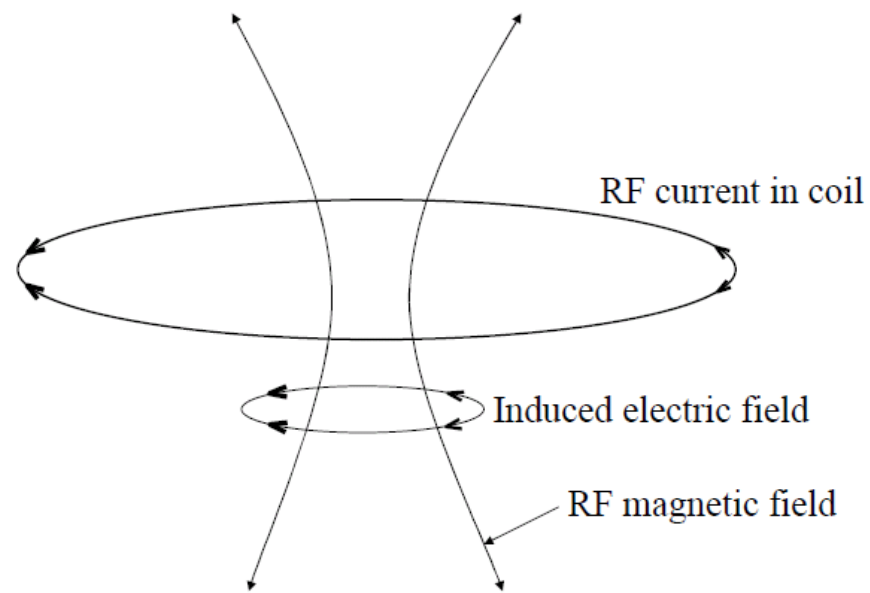
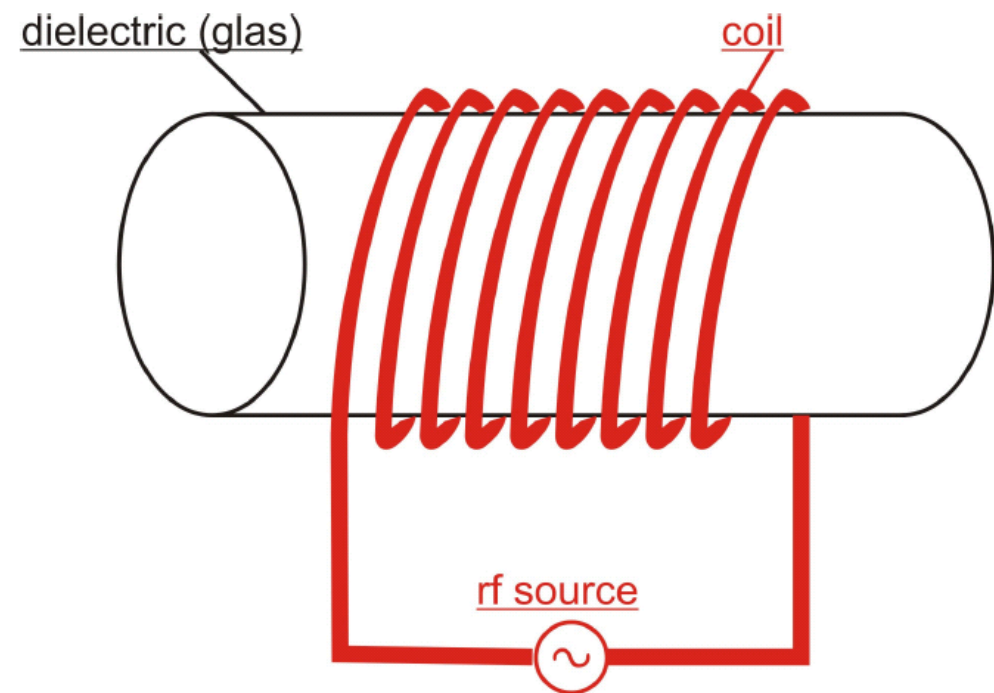
Electron cyclotron resonance plasma (less common nowadays)



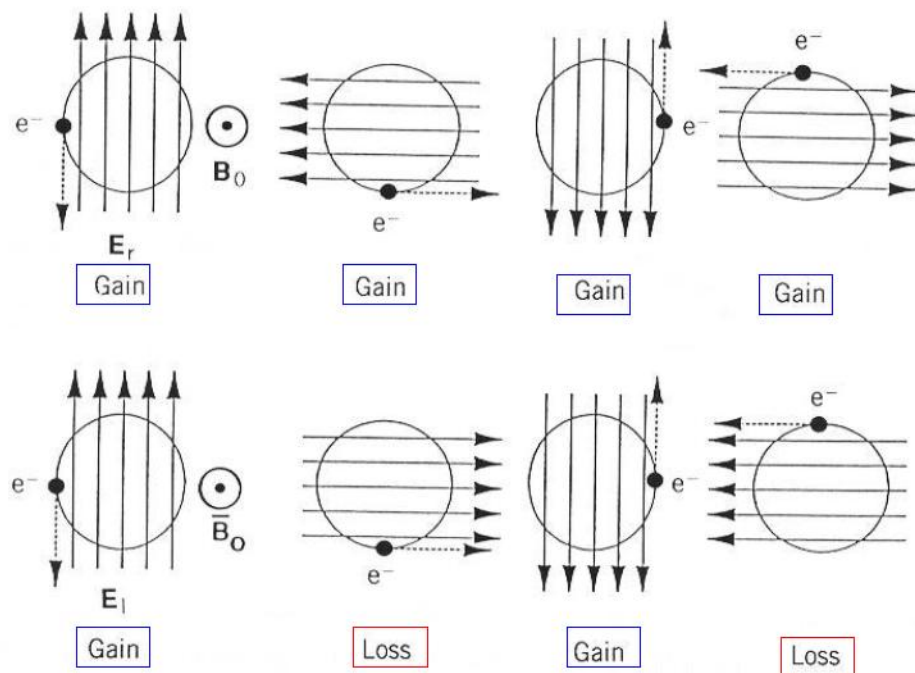
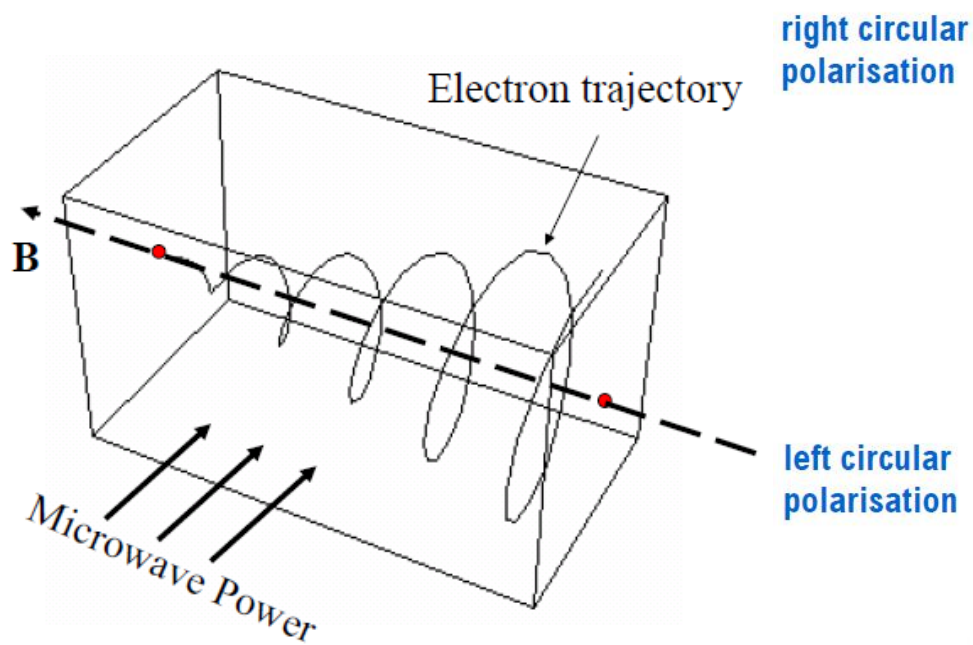
Inductively coupled plasma (ICP) (four systems at Waterloo)



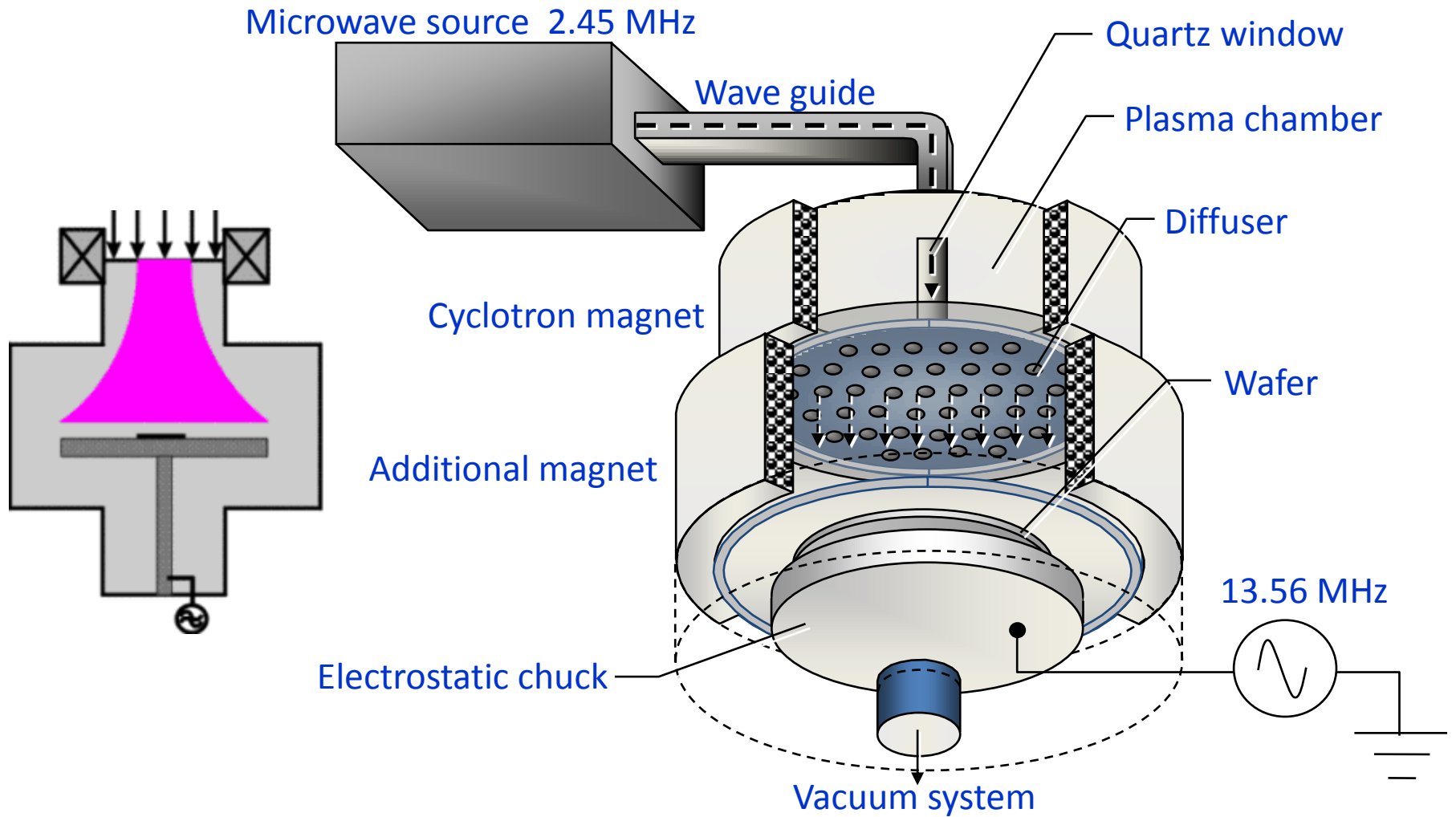
- High magnetic field in the coil, so electrons move in circles with long path, leading to higher collision and ionization probability, and much less electron loss to chamber wall and the bottom plate where sit the wafer. Moreover,
- For ICP, **AC magnetic field** induces circular electrical field, which accelerates electrons.
- For ECR, **DC magnetic field**, electron cyclotron $\omega = qB/m$; electrons accelerated if this frequency matches the microwave frequency.



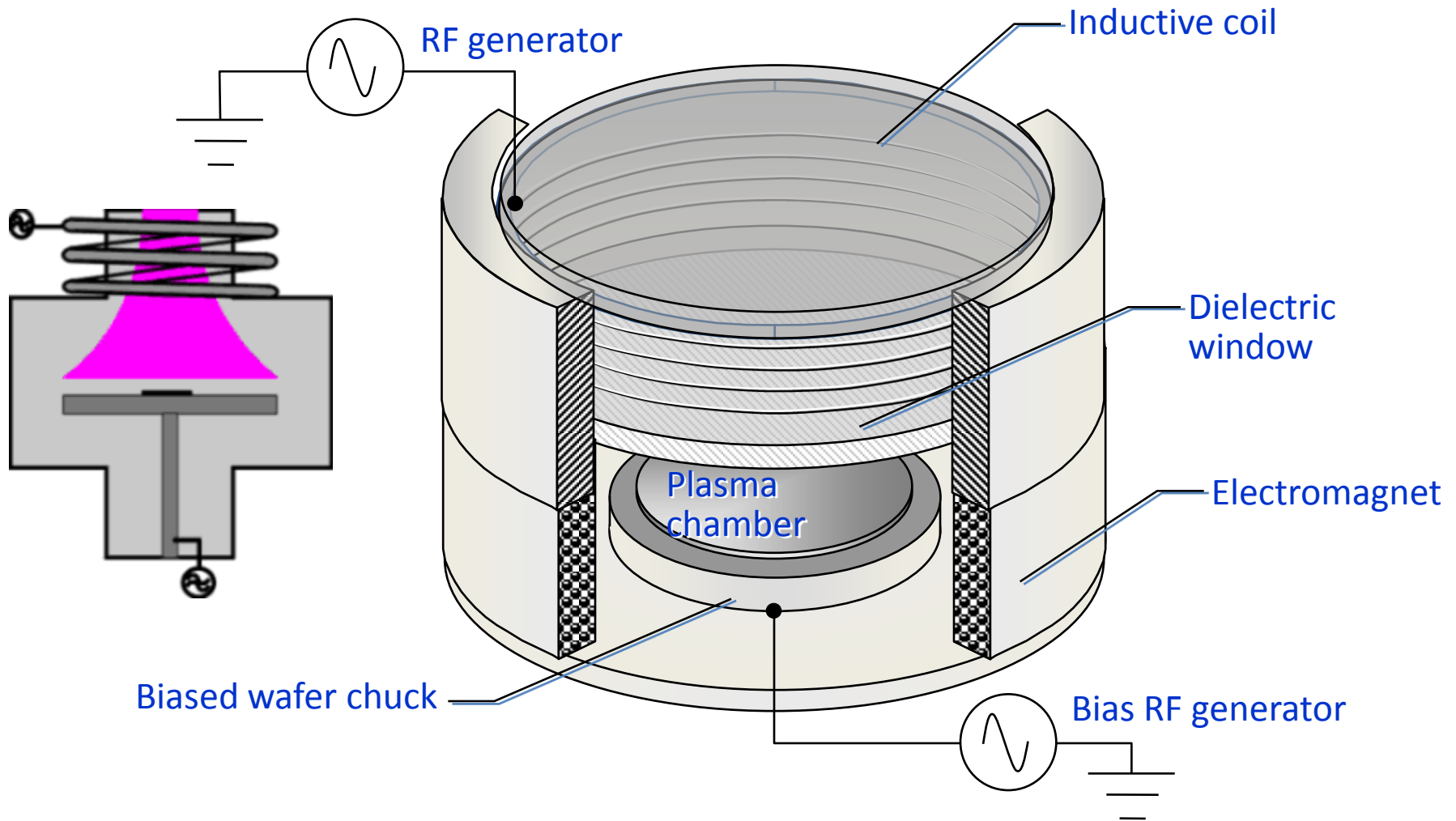
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re } \hat{x} E_x(\vec{r}) \exp(i\omega t)$$



Schematic of ECR etcher



Schematic of ICP etcher

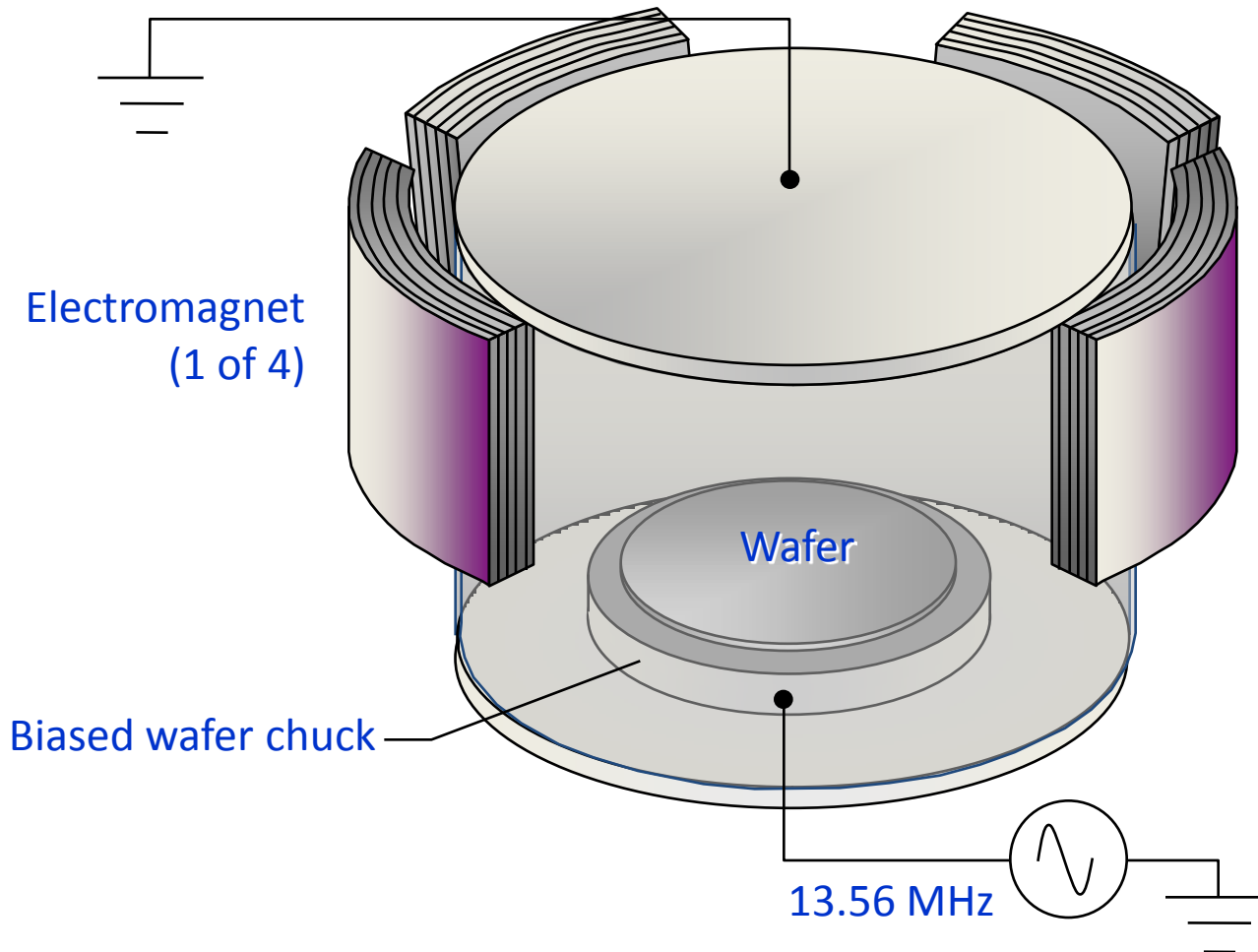


As you see, there is practically no top plate as in parallel plate regular RIE. The wafer sees the ICP power – the two power sources are not physically separated. Otherwise, even though the plasma density in the upper part is high, it will get lost due to re-combination and de-excitation when it travels through the bottom part.

Magnetically enhanced reactive ion etch (MERIE)

Like regular parallel plate RIE, but magnetic field forces electron to go circles, increasing collision with gas molecules and decreasing loss to chamber walls or top/bottom plates.

However, now that electrons don't loss to bottom plate, no or little bias voltage – need to apply an external bias to accelerate ions.



I haven't seen any MERIE, so it is not popular.

On the contrary, magnetron sputtering is very popular.

This is probably because there are many ways to increase etching rate; but sputter without magnetron is always very slow:

few nm/min, vs. 10s to 100s nm/min RIE etching rate.

Sputter etching and ion milling

Sputter etching: (etch *inside* plasma)

- The etch mechanism is purely physical and ion energies are greater than 500 eV.
- Very similar in principle to sputter deposition, but now the target becomes substrate to etch.
- Poor selectivity (2:1 or 1:1), very anisotropic.
- Sputtering rate depends on sputter yields which can be a function of incident angle.
- Problems include faceting (sputter yield is a function of incident angle), trenching, re-deposition, charging and ion path distortion, radiation damage.
- Not popular, etches too slow, though reactive gas (CF_4 , CCl_4 , O_2) can be added to slightly improve selectivity and etching rate.

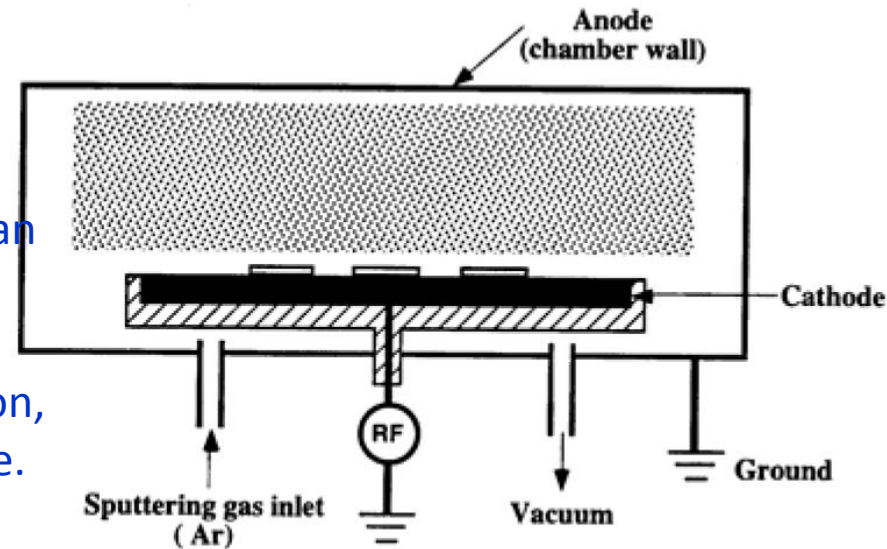
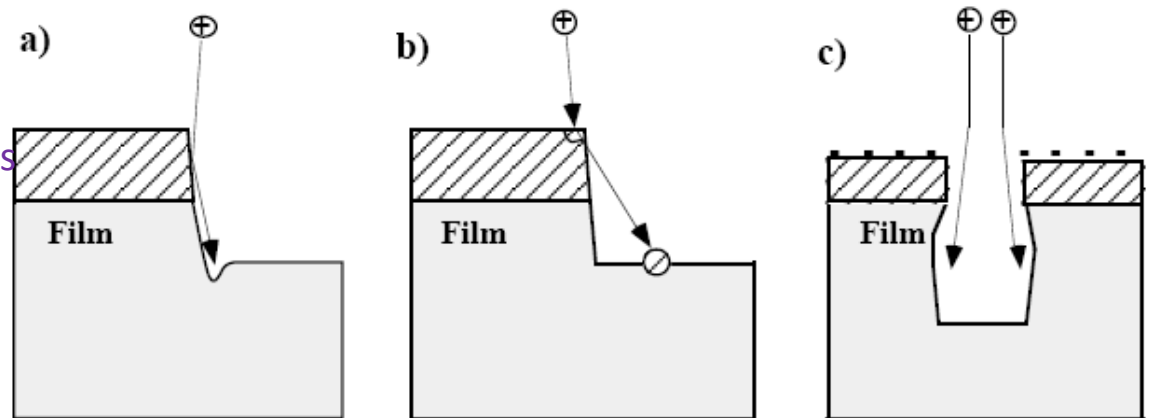


Figure 10-8 Problems associated with sputter etching (or any etching that has a high degree of physical/ionic etching): a) trenching at bottom of sidewalls; b) redeposition of photoresist and other materials; c) charging and ion path distortion.



Ion milling or ion beam etching (IBE)

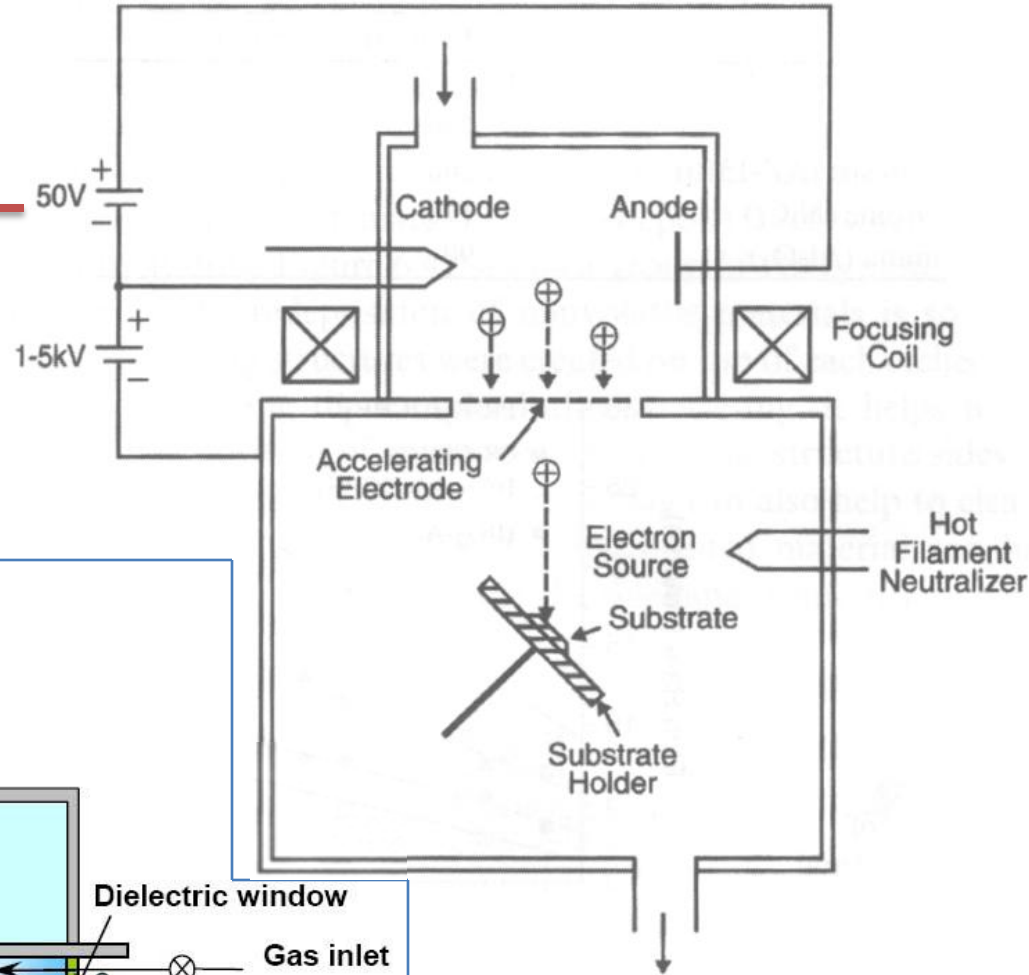
Used to call ion milling, seems now more called as ion beam etching.

- Physical milling when using heavy inert gases (Ar).
- Plasma is used to generate ion beam (Ar^+), which is extracted and accelerated to etch the sample. (i.e. *sample outside of plasma*)
- Thus the ion density (determined by plasma source) and ion energy (determined by DC acceleration voltage – bias by applied DC voltage, not by RF bias as in high density plasma etching system), can be controlled independently.
- Low pressure $\sim 10^{-4}$ Torr (>1 order lower than RIE), so large mean free path and less energy loss due to collision. (such low pressure cannot sustain a plasma, so ion milling is not plasma etching)
- High acceleration voltage ($>1\text{kV}$), leading to mill rate $\sim 10\text{-}30\text{nm}/\text{min}$.
- Despite the high voltage and low pressure, such a rate is still $<$ typical RIE rate where chemical etching dominates.
- Used whenever RIE is not possible (due to the lack of volatile species formation). Usually employed to etch Cu, Ni, Au, superconducting materials containing metals...

Ion beam etching system: triode configuration

Electron beam is first generated by hot filament.

Ions are generated by electron bombardment, then accelerated to bombard the substrate.



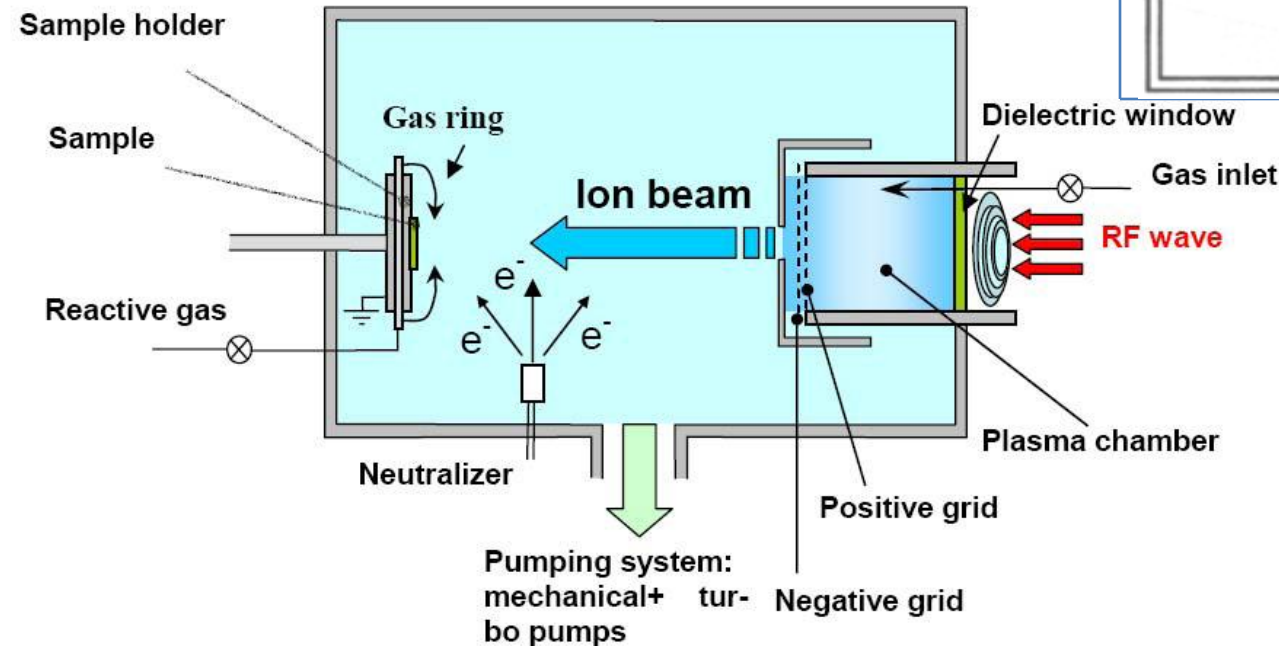
RF plasma ion beam source
(here reactive gas added, so it is actually a CAIBE, see next slide)

DC plasma ion beam source

Electrons sprayed to sample to neutralize ions.

Tilted sample to greatly increase milling rate.

But then shadowing may become a problem when milling high aspect ratio structures.

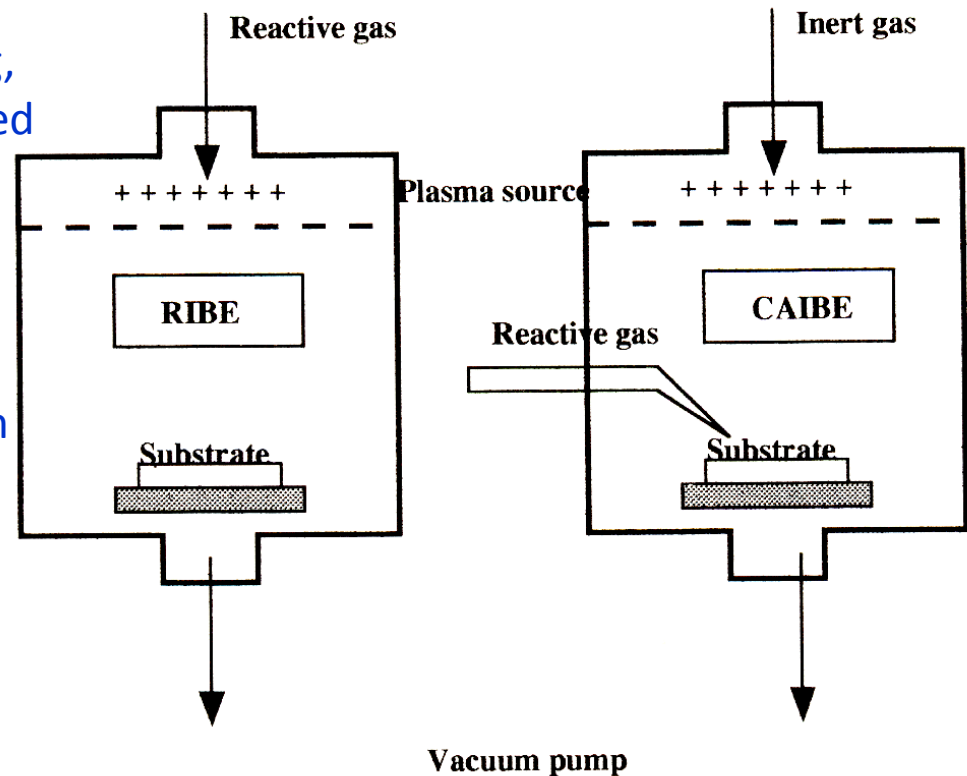


Chemically assisted ion beam etching system

- Adding reactive gases (CF_4 , CCl_4 , O_2 , Cl_2) to increase etching rate and selectivity.
- Usually physical etching still dominates, no need of volatile etch product.
- But for some special situations, like gas phase (no plasma) XeF_2 etching of Si assisted by ion bombardment, chemical etching dominates with very high etching rate. But there the etch product SiF_4 is volatile.
- Here it is chemically assisted physical etching, different from RIE that is a kind of physically assisted chemical etching.

- **CAIBE:** chemically assisted ion beam etching, inert Ar ion, neutral reactive gas is introduced into lower chamber, so not ionized, though some may be ionized due to backflow into plasma region or bombardment by Ar ion.

- **RIBE:** reactive IBE, reactive gases are introduced into plasma region together with Ar gas, so they are ionized. RIEB is virtually the only example where the same ion has both a physical (ion impact) and chemical (reactive etching) component.



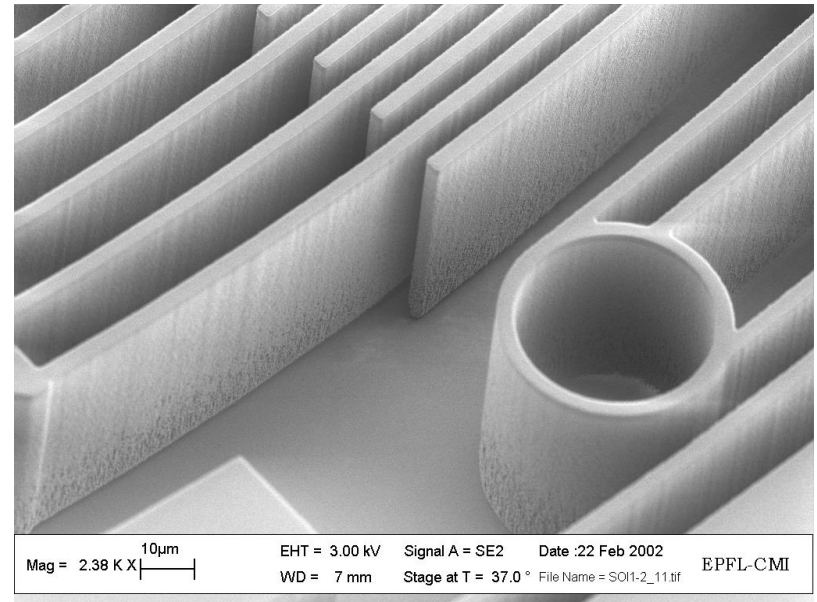
Ăn mòn Si

1) Deep anisotropic etching:

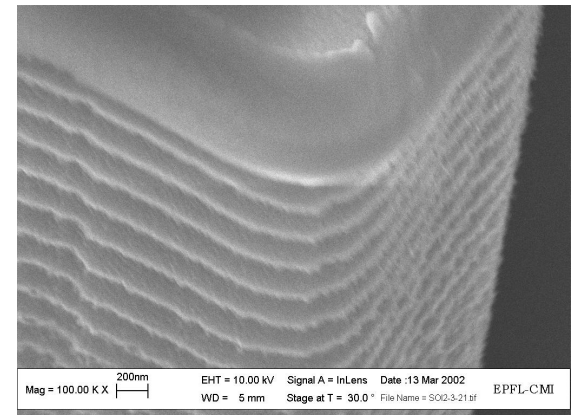
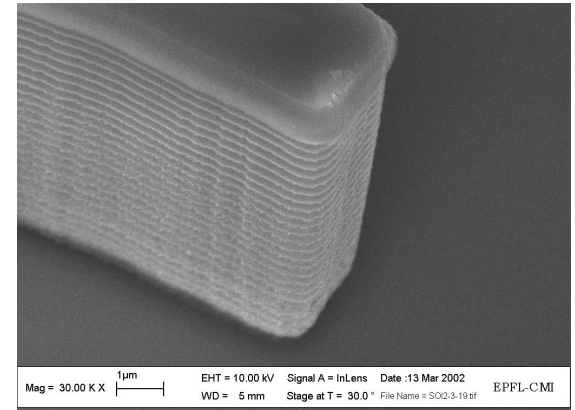
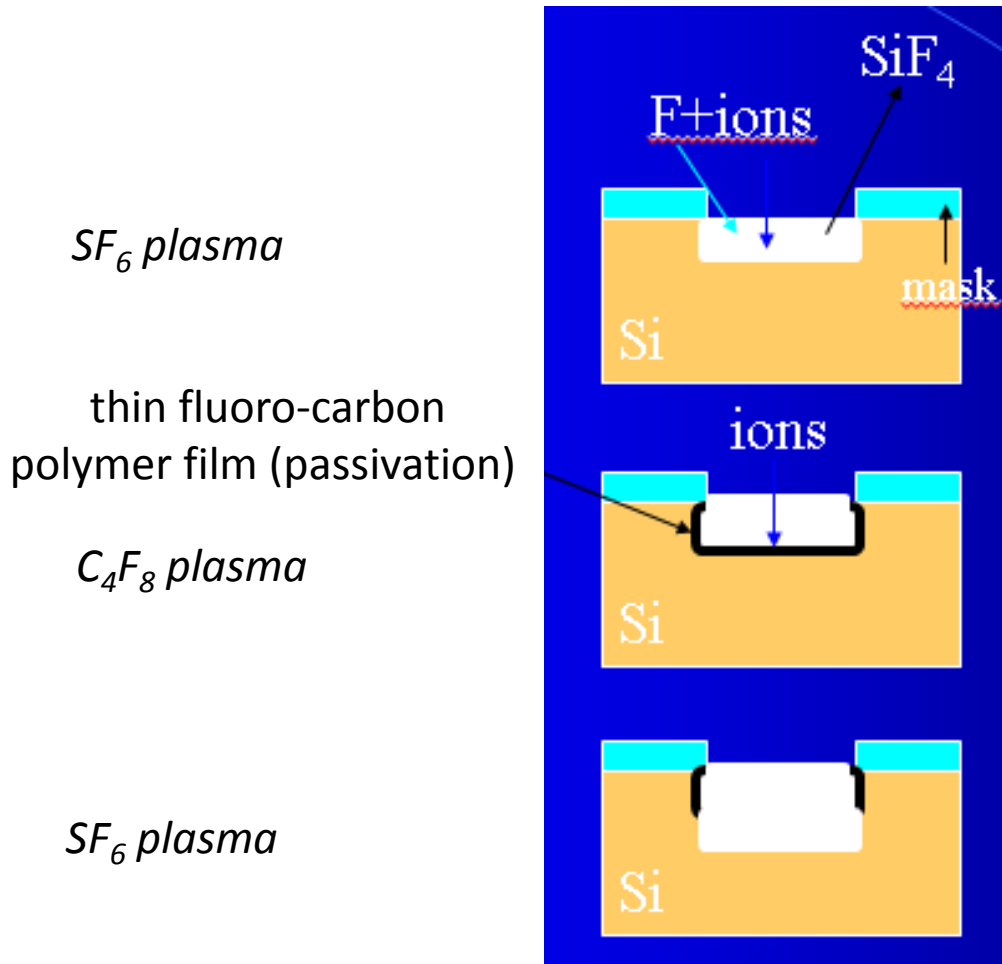
- Bosch process,
- Room T continuous process,
- Cryogenic process.

2) Thin film etching.

3) Isotropic etching.



Basic on Bosch process

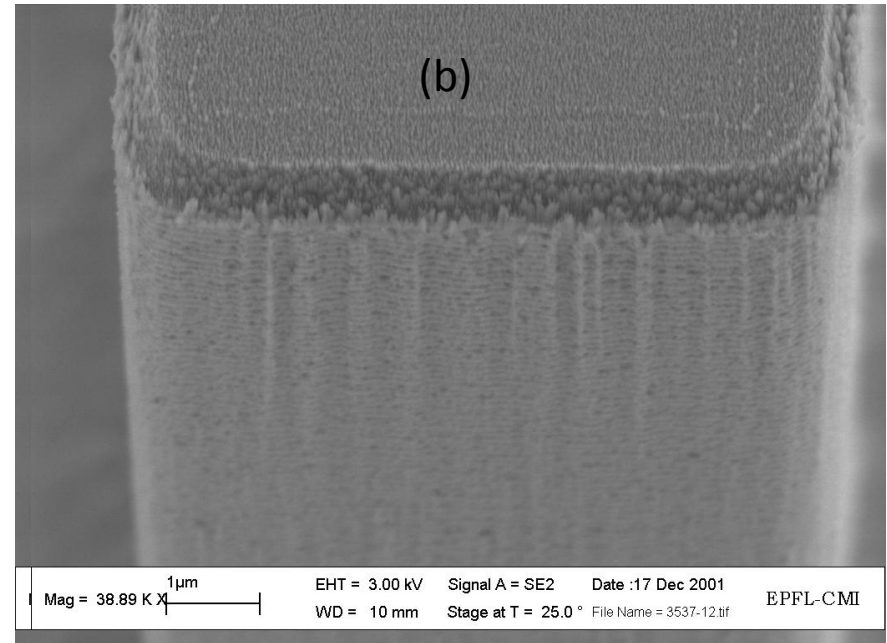
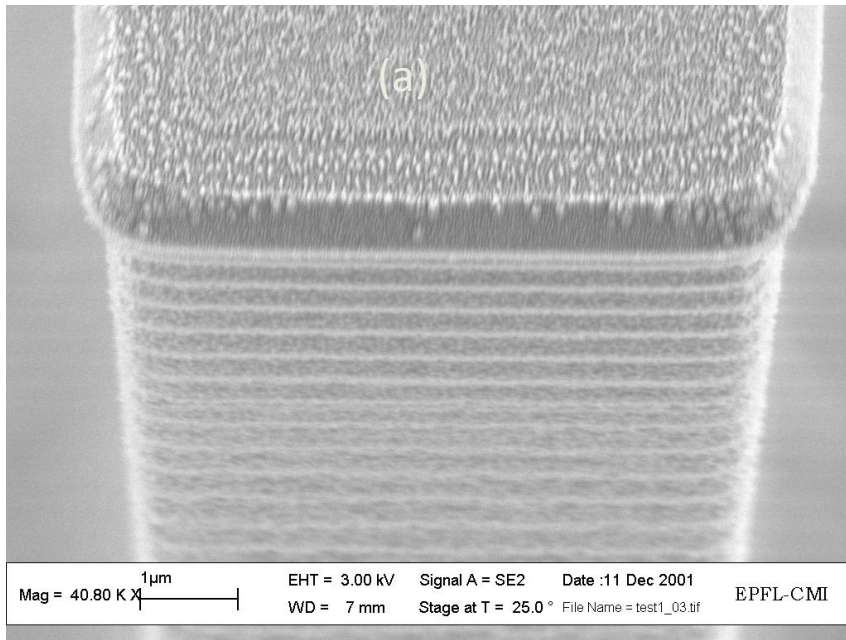


Si etching using Bosch process
- scalloping effect

Basic on Bosch process

- Anisotropy at 90° (vertical sidewall),
- Etching uniformity (2 % to 5 %),
- Selectivity Si:SiO₂ (1:200 to 400),
- Etching rate: 6 to 12 um/min,
- Sidewall roughness (actual process development),
- Notching (hardware modification + process development).

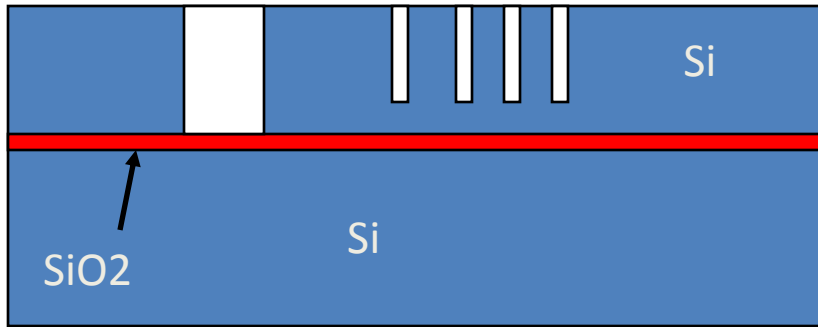
Bosch process: sidewall roughness



Sidewall roughness at the top of a deep anisotropic etching of Si (Bosch process on A601E) as a function of pulse duration:

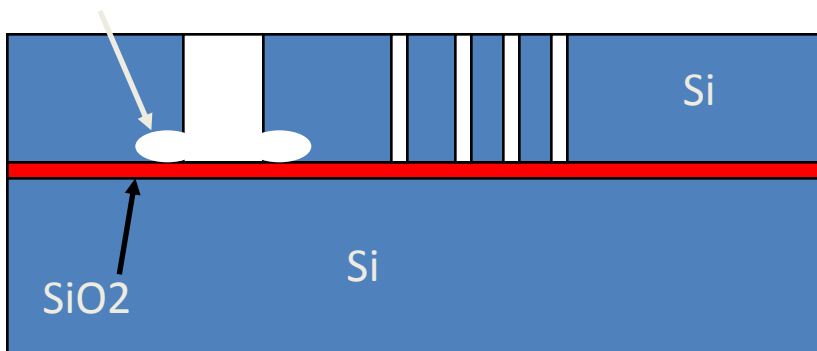
(a) SF6/C4F8 = 7s/2s (b) SF6/C4F8 = 3s/1s.

Bosch process: notching effect

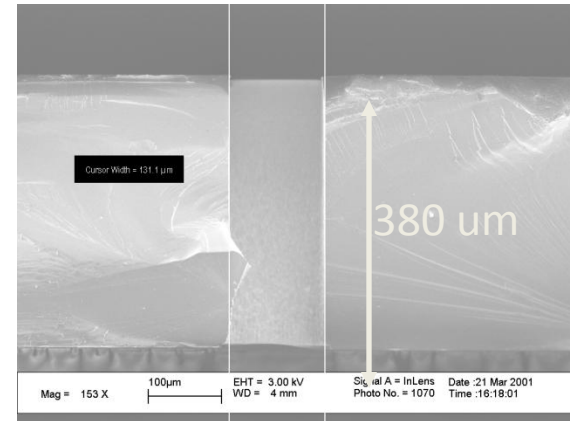


x min etching

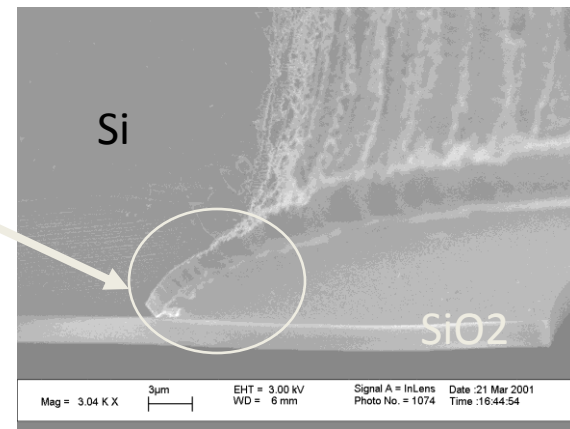
notching



x min + overetch time

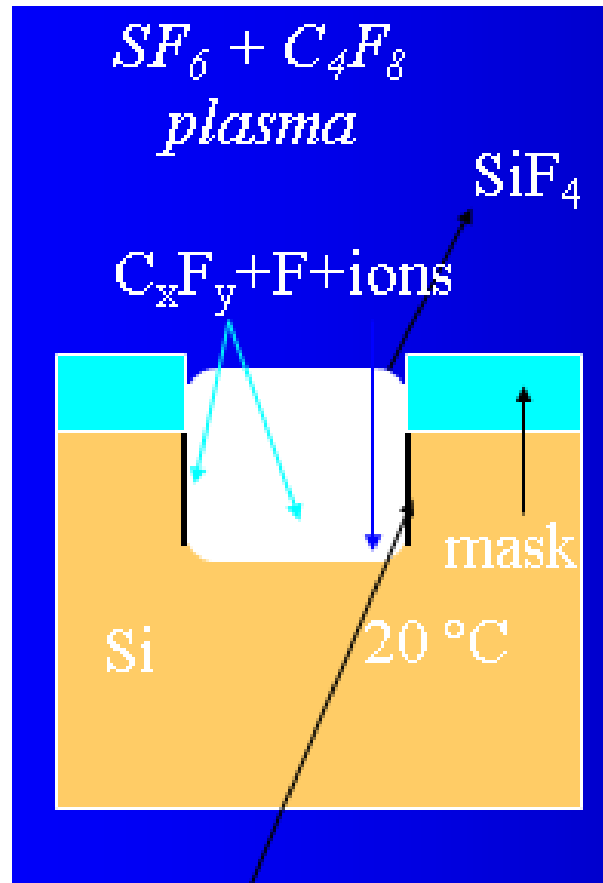


notching



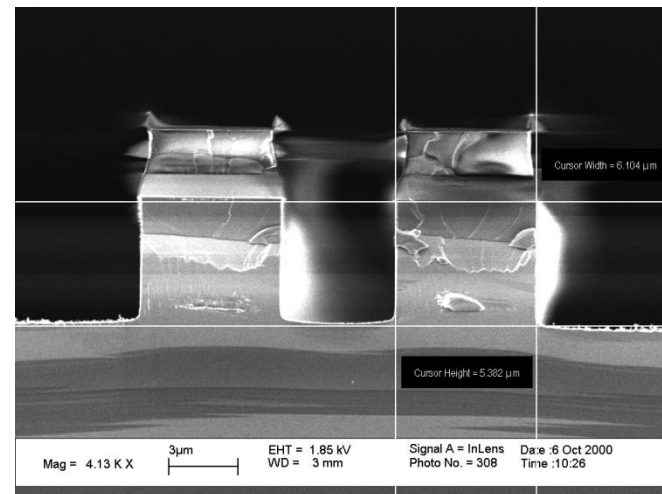
Etching through a Si wafer and stop on SiO₂

Room T continuous process



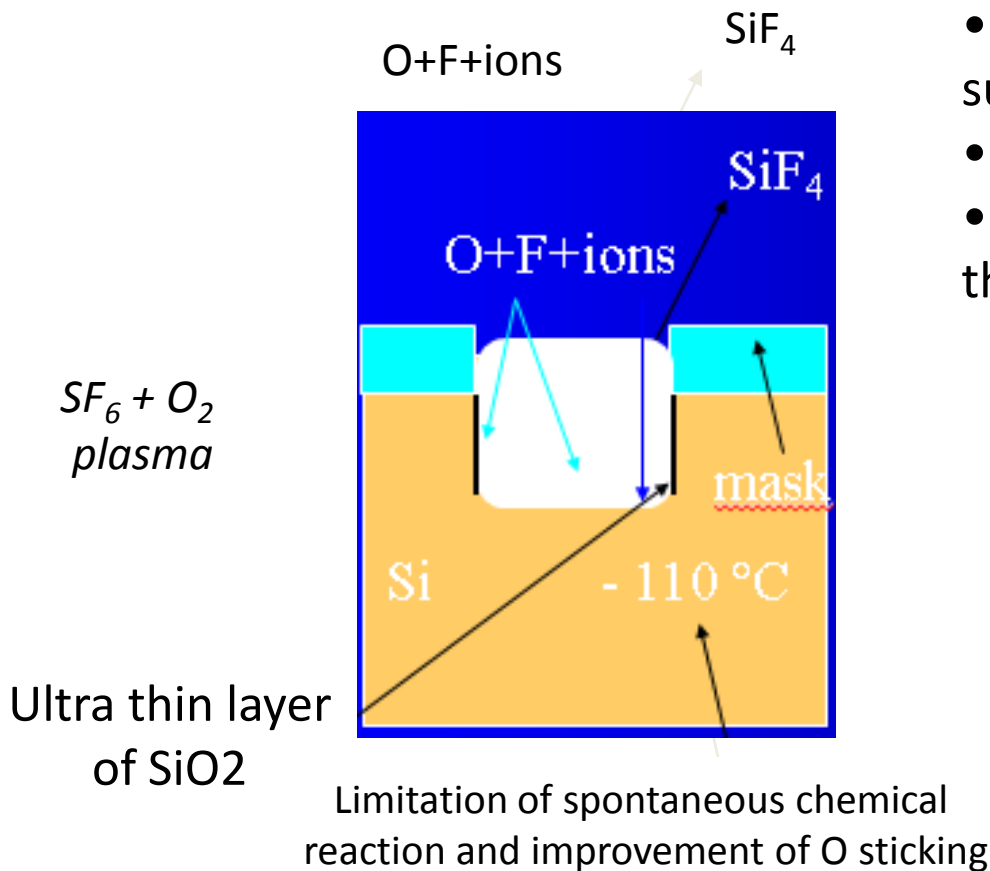
thin fluoro-carbon polymer film

- very good anisotropy,
- low roughness,
- low etch rate,
- well suited for low depth (<5 μm).

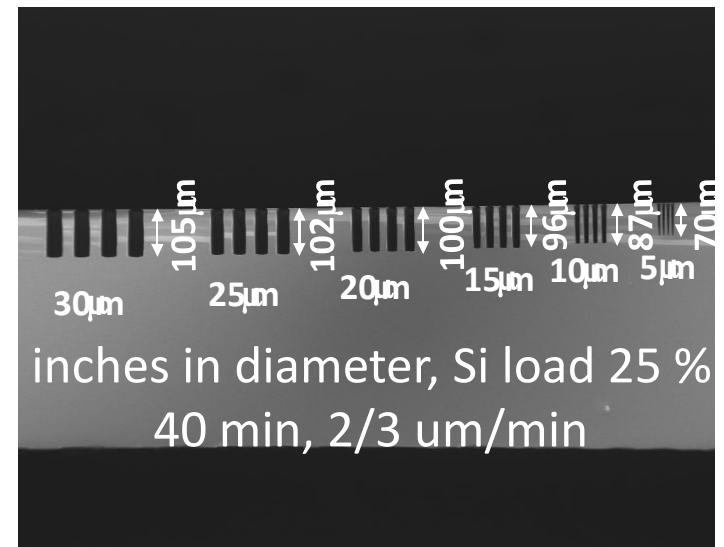


RIB waveguide on SOI wafer etch

Cryogenic process

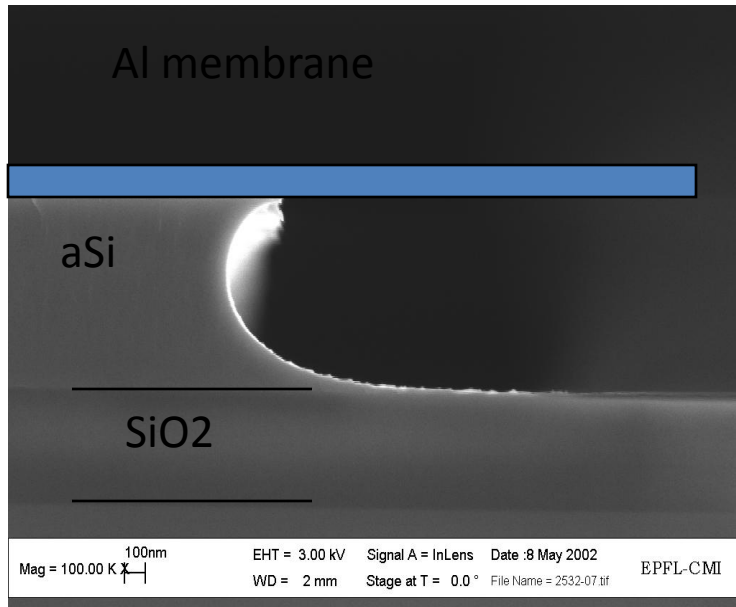


- No polymer contamination (reactor, substrate),
- Low sidewall roughness (20 nm P to P),
- BUT sensible process and not so flexible than Bosch process!



Etching of different trenches width in bulk Si.

Si isotropic etching



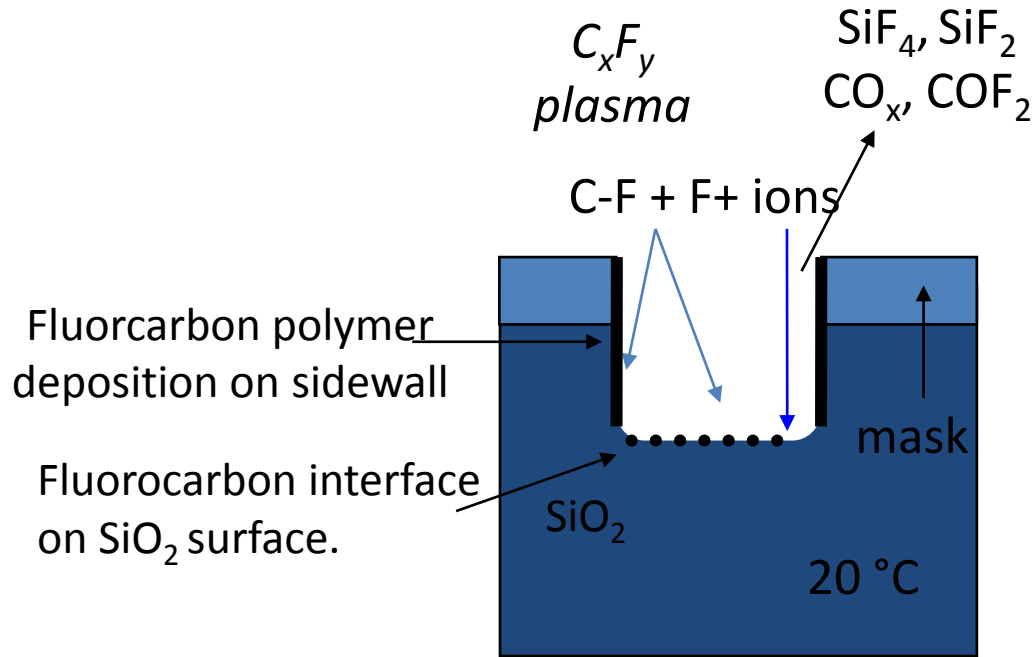
Isotropic Si etching

Largely used process for metal membranes releasing,
More efficient dry release compare to polymer sacrificial layer,

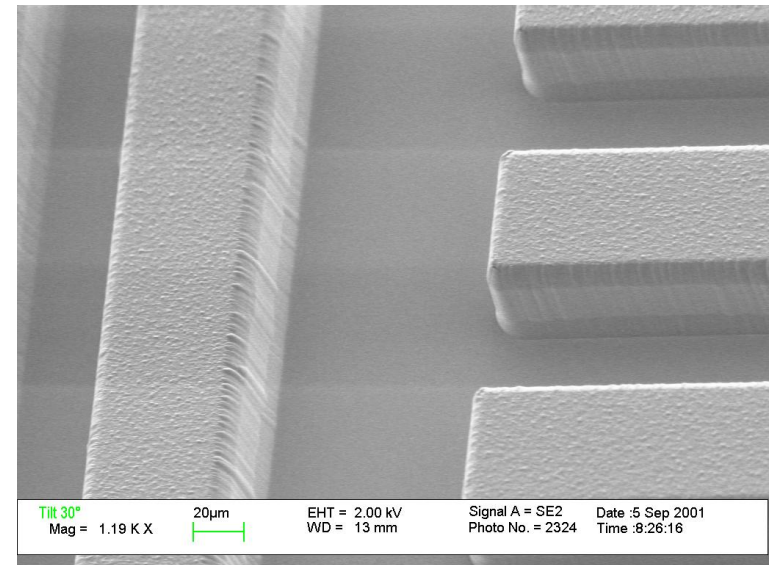
Carateristics:

- Undercut etch rate can reach 7 $\mu\text{m}/\text{min}$ (for 1 μm aSi),
- Selectivity Si:SiO₂ > 1000,
- lateral aspect ratio > 200.

Deep SiO₂ etching (1)



Key parameters: mask material, ions flux and energy (pressure, rf source power, DC bias), C/F ratio (chemistry).



Bulk fused silica etching (40 μm depth) on STS Multiplex ICP

Deep SiO₂ etching (2)

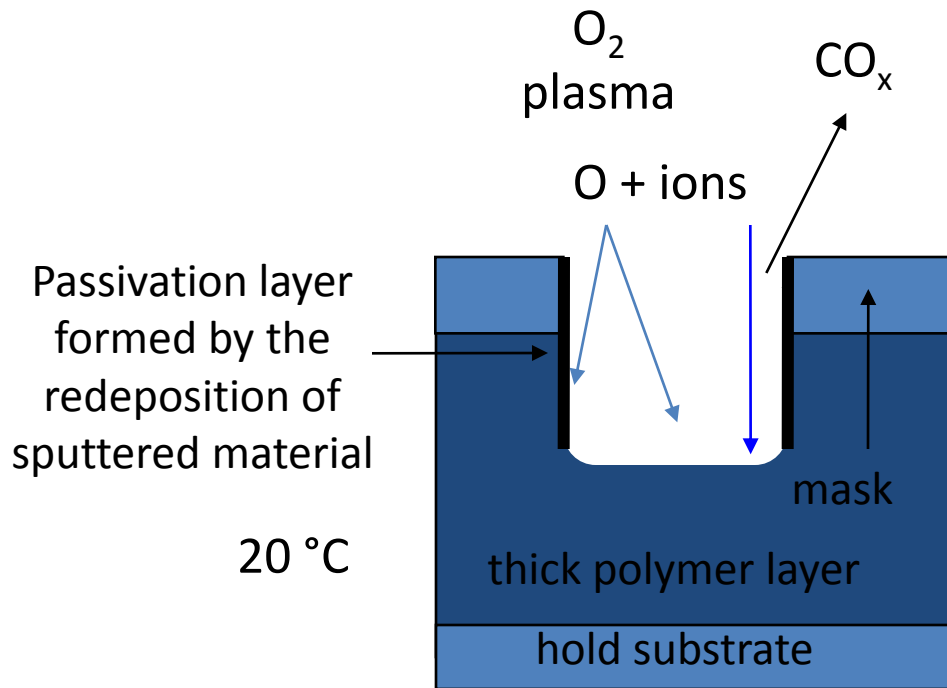
Discussion:

- Anisotropy (vertical sidewall),
- Masque material (PR, aSi, Al, Cr, Ni...),
- Selectivity SiO₂:mask (C/F, pressure, DCbias),
- Reactor contamination (hardware problem),
- Etch rate (till 1 um/min),
- Roughness and slope sidewall,
- Increase the aspect ratio.

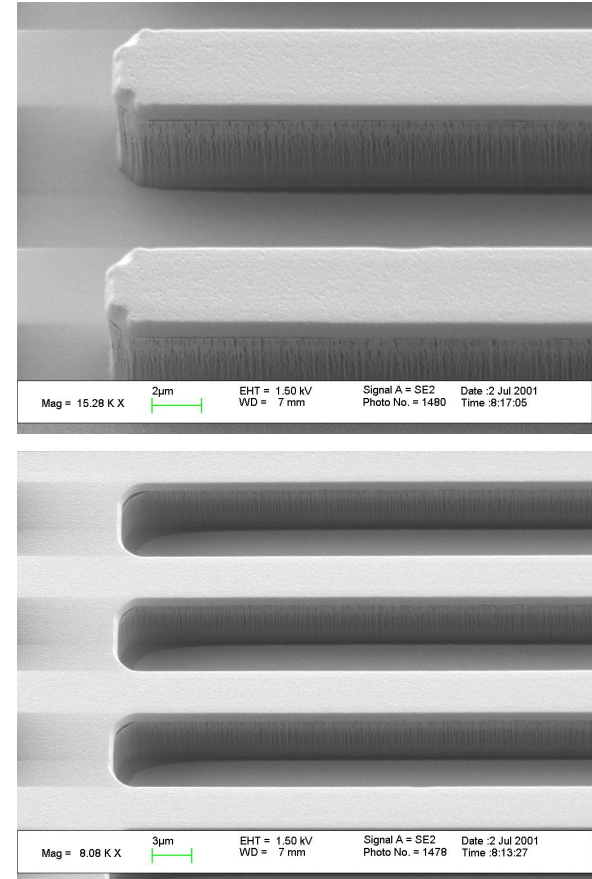
} Under control

} challenges

Deep polymer etching

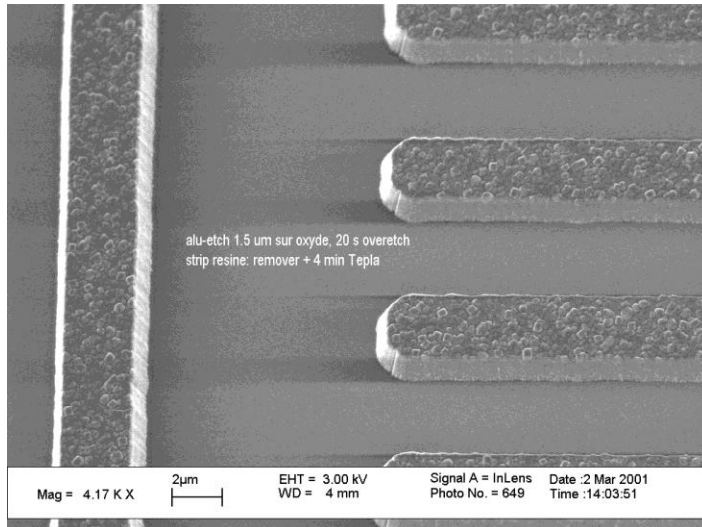


- Mask (PR, SiO_2 , Al, Pt),
- ER: 1 $\mu m/min$.



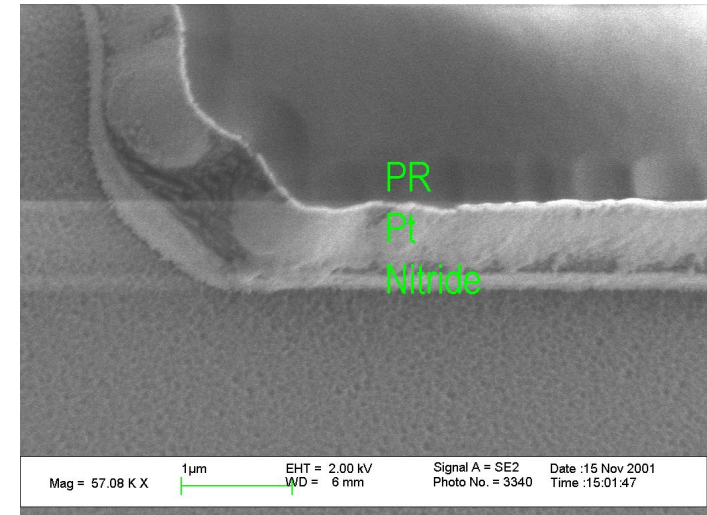
6 μm polyimide etching on
STS Multiplex ICP

Ăn mòn kim loại



AlSi etching using Cl_2/BCl_3 chemistry
(on STS Multiplex ICP)

- selectivity Al:RP \approx 2:1,
- ER: 0.2 to 0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$.

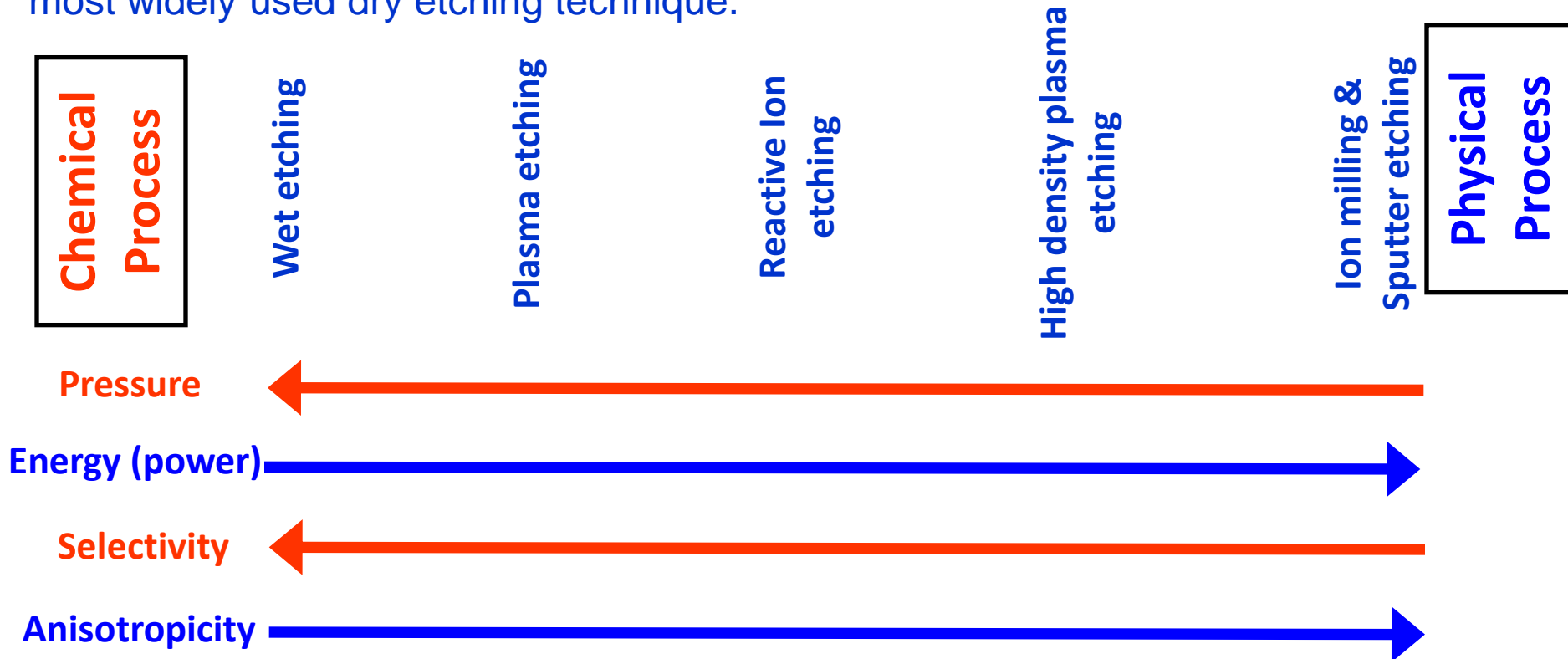


Pt etching using Cl_2/Ar chemistry (on
STS Multiplex ICP)

- selectivity Pt:RP \approx 1:8,
- ER: 30 nm/min .

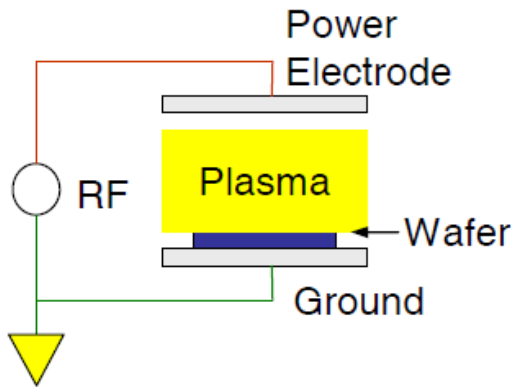
Tóm lược: cơ chế ăn mòn plasma

- **Ăn mòn hóa học**: free radicals react with material to be removed. E.g. plasma etching at high pressure close to 1 Torr.
- **Ăn mòn vật lý hay phún xạ**: ionic species, accelerated by the built-in electric field (self-bias), bombard the materials to be removed. E.g. sputter cleaning using Ar gas in sputter deposition system.
- **Ăn mòn tăng cường ion**: combined chemical and physical process, higher material removal rate than each process alone. E.g. reactive ion etching (RIE), which is the most widely used dry etching technique.



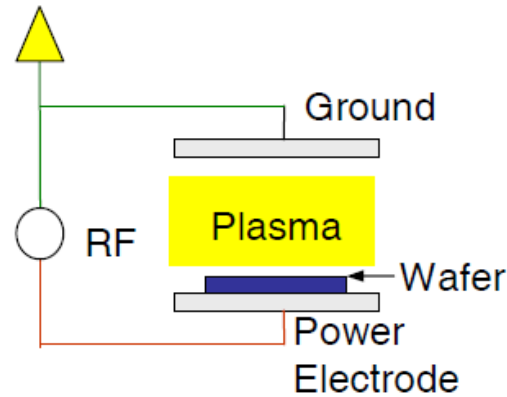
Các một ăn mòn plasma

Plasma Etching



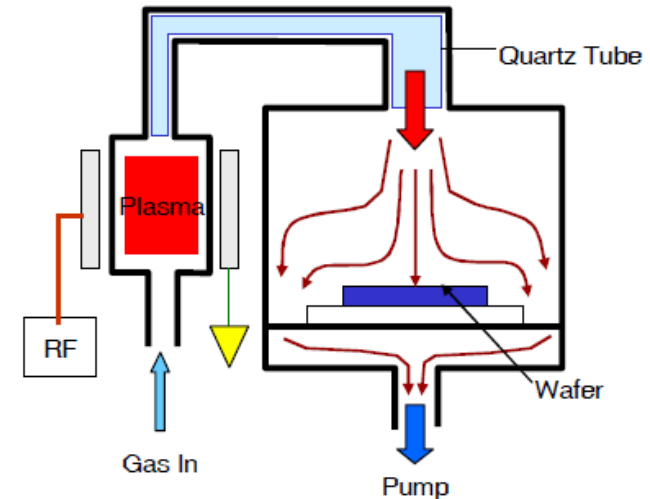
- Substrate on ground electrode
- Less ion bombardment
- Medium etch rate and selectivity

Reactive Ion Etching



- Substrate on power electrode
- Intense ion bombardment
- High etch rate, Low selectivity

Remote Etching



- Substrate not in plasma region
- No ion bombardment
- Pure chemical etch
- No radiation damage
- High selectivity
- Isotropic etching