



Master course
ITIMS, July 16, 2020



Công nghệ chế tạo MEMS

Chu Manh Hoang, Assoc. Prof. PhD

International Training Institute for Materials Science
Hanoi University of Science and Technology

hoangcm@itims.edu.vn

Chương 2. Công nghệ vi cơ

1.1. Công nghệ vi cơ khối ướt

1.2. Công nghệ vi cơ khối dựa trên ăn mòn ion phản ứng

1.3. Công nghệ vi cơ bề mặt

1.4. Đánh bóng cơ học

1.5. Công nghệ in dập khuôn

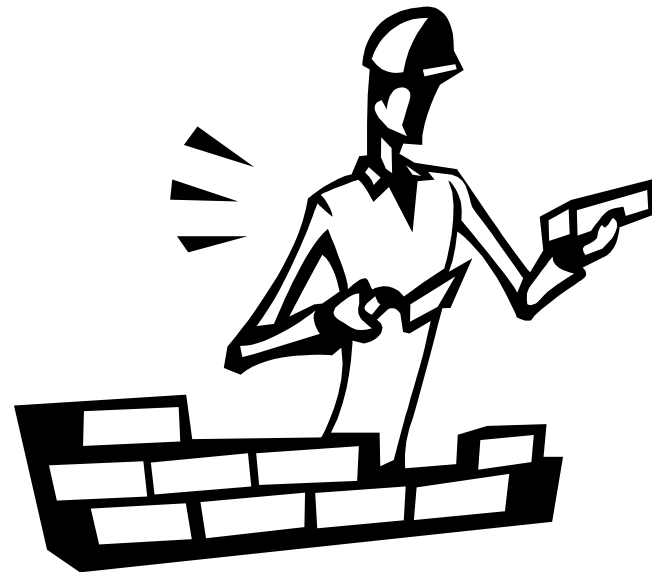
1.6. Công nghệ khắc dùng chùm tia ion tụ tiêu

Công nghệ vi cơ

- **Vi cơ khối:** là quá trình tạo ra các cấu trúc trên đế bằng ăn mòn chọn lọc.
- **Vi cơ bề mặt:** là một quá trình tạo ra các cấu trúc trên bề mặt đế bằng cách lắng đọng màng mỏng và ăn mòn chọn lọc.

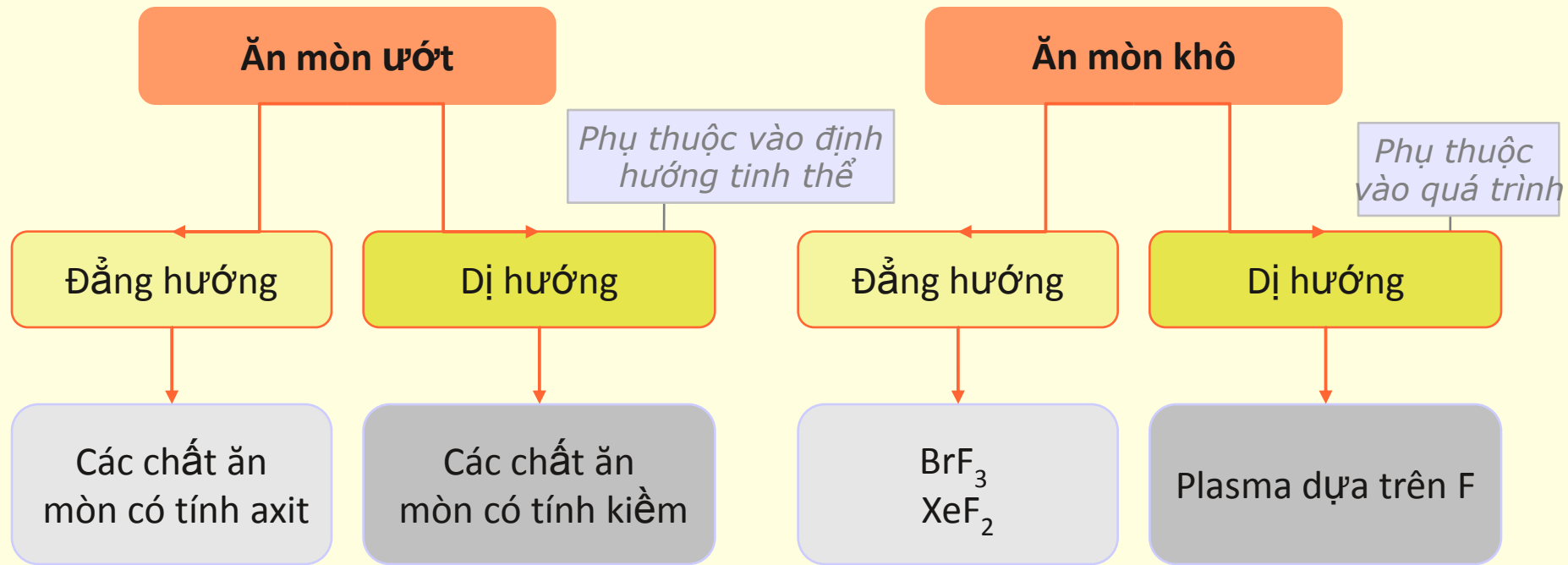


Bulk Micromachining



Surface Micromachining

Phân loại kỹ thuật ăn mòn sử dụng trong vi cơ khối



Các đặc trưng ăn mòn

■ Tốc độ ăn mòn:

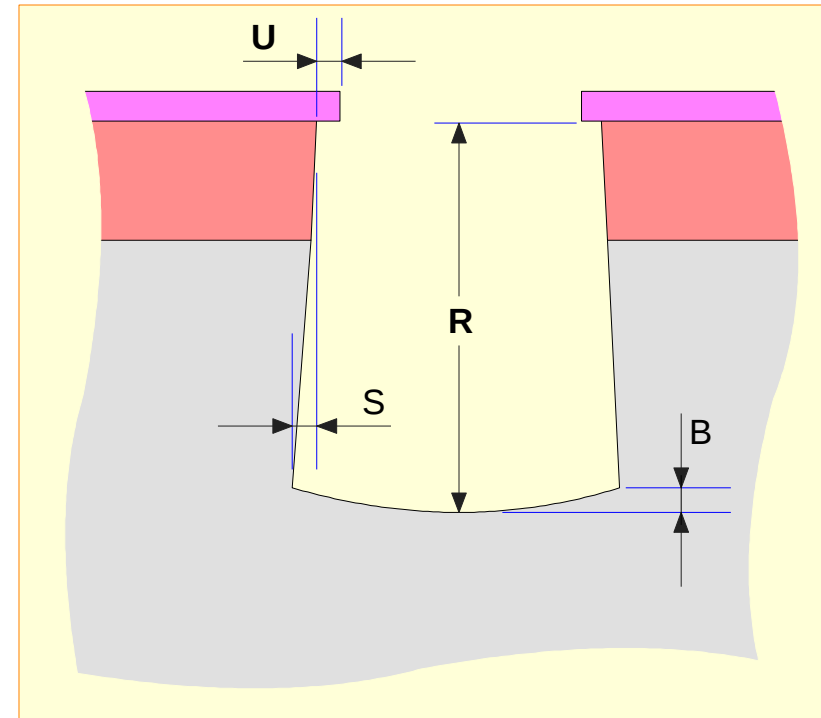
- ▶ Rate of removal of material/film.
- ▶ Varies with concentration, agitation and temperature of etchant, porosity and density of etched film.

■ Độ chọn lọc của ăn mòn:

- ▶ Tốc độ ăn mòn tương đối của mặt nạ so với các màng và đế vật liệu.

■ Hình học của cấu trúc ăn mòn:

- ▶ Chiều sâu ăn mòn (R);
- ▶ Độ ăn mòn ngang (U);
- ▶ Độ dốc của các bức tường bên (S);
- ▶ Độ cong của đáy cấu trúc ăn mòn (B);
- ▶ Tính dị hướng.

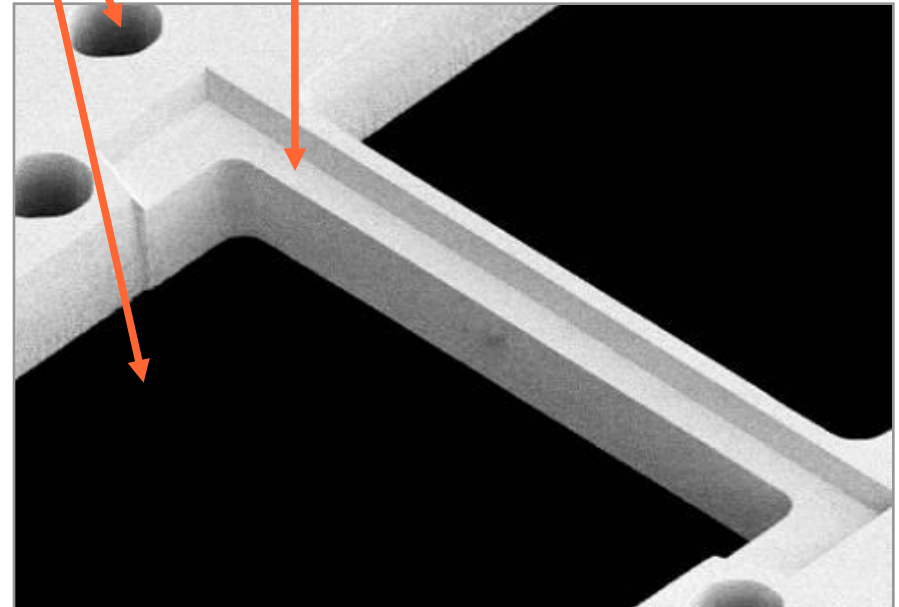
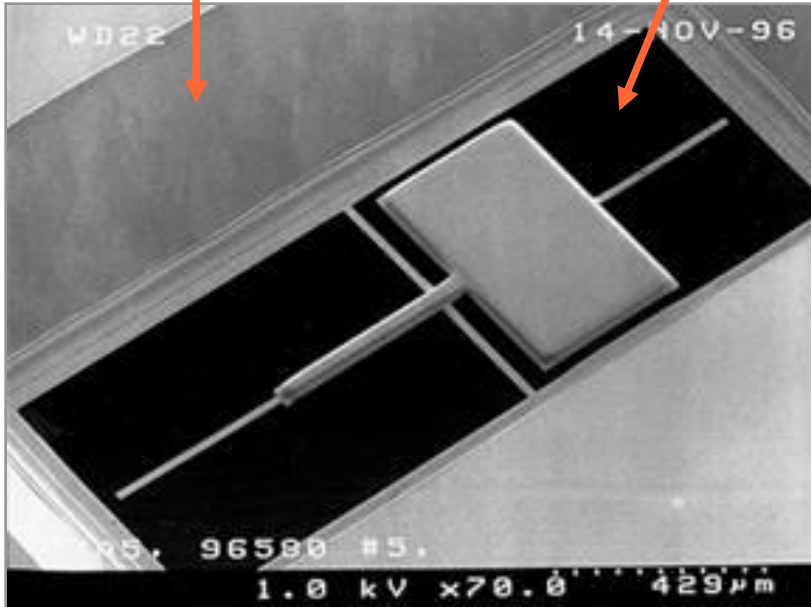


Các ví dụ: Ăn mòn Silic khối

Deep cavity by wet,
anisotropic etching

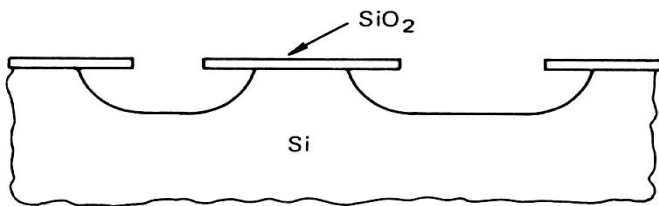
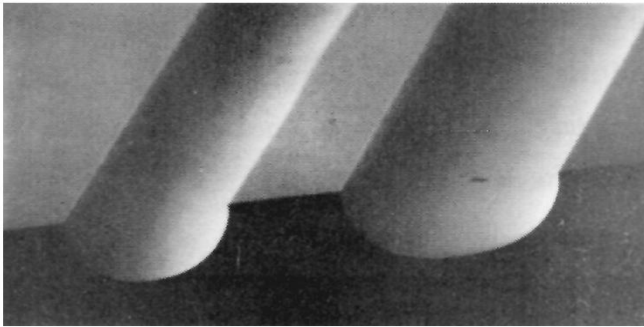
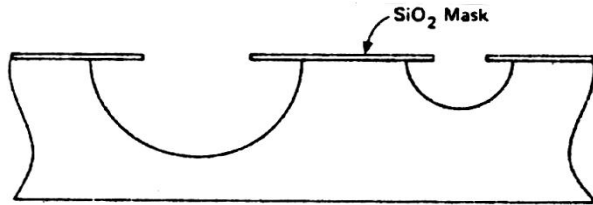
Release etch
by RIE

Recess etch
by RIE

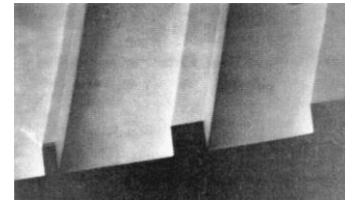


Các ví dụ: Ăn mòn ướt Silic

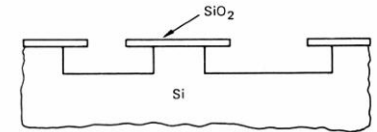
Isotropic etching with **HNA**
(HF : Nitric Acid : Acetic Acid)



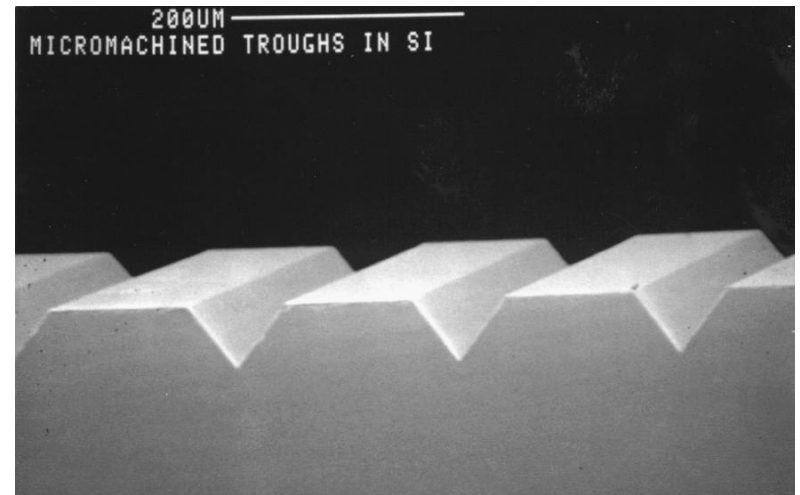
Anisotropic etching with **KOH**



(110)



(100)

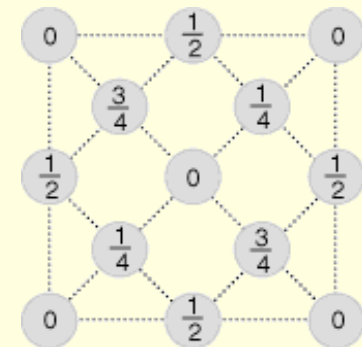
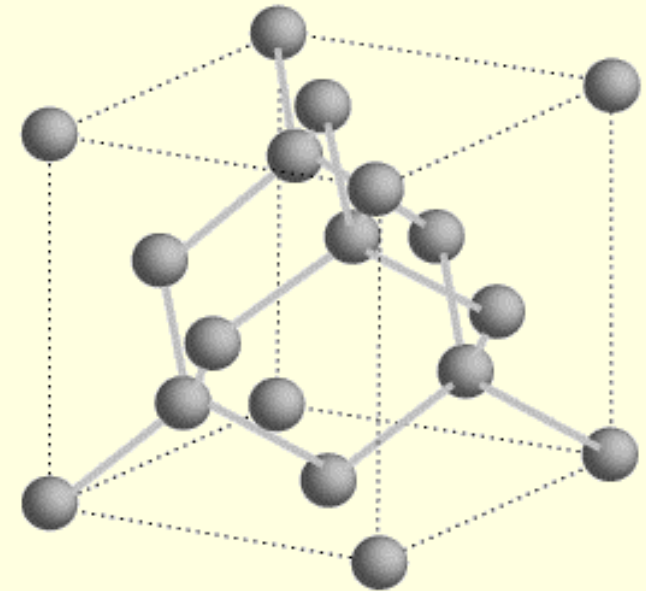


Tinh thể Silic

Cấu trúc đơn tinh thể Silic

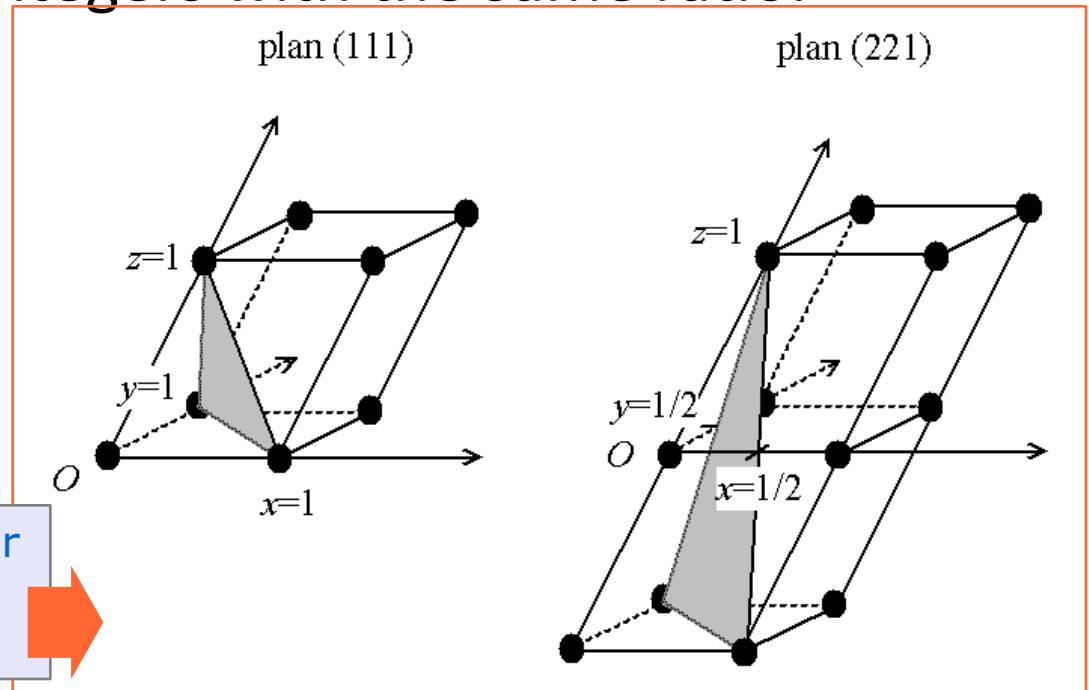
- **Face-centred cubic (fcc)** structure (diamond structure) with two atoms associated with each lattice point of the unit cell.
- One atom is located in position with xyz coordinates $(0, 0, 0)$, the other in position $(a/4, a/4, a/4)$, a being the basic unit cell length.
- Lattice constant $a = 5.43 \text{ \AA}$.

The arrangement of the silicon atoms in a unit cell, with the numbers indicating the height of the atom above the base of the cube as a fraction of the cell dimension.



Chỉ số Miller

- **Miller indices** are a notation system in crystallography for planes and directions in crystal lattices.
- A lattice plane is determined by three integers **h**, **k** and **l**, the Miller indices, written **(hkl)**. The indices are reduced to the smallest possible integers with the same ratio.

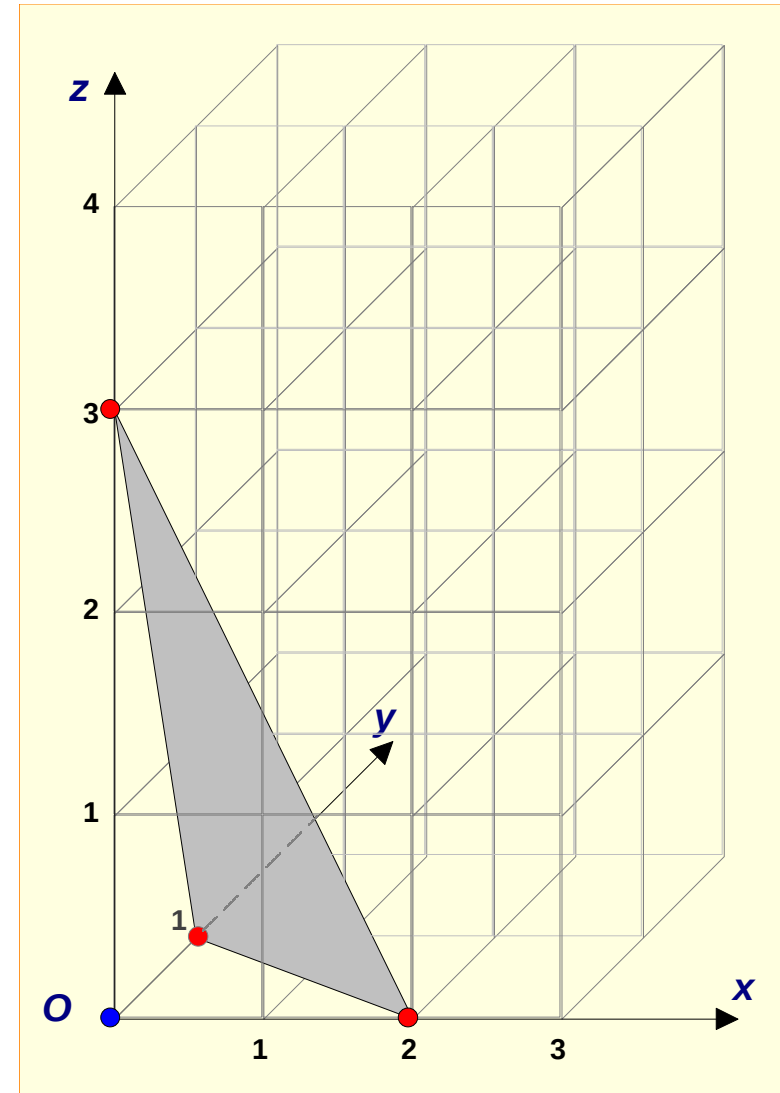


Determining the Miller indices for planes by using the intercepts with the axes of the basic cell.

Xác định chỉ số Miller

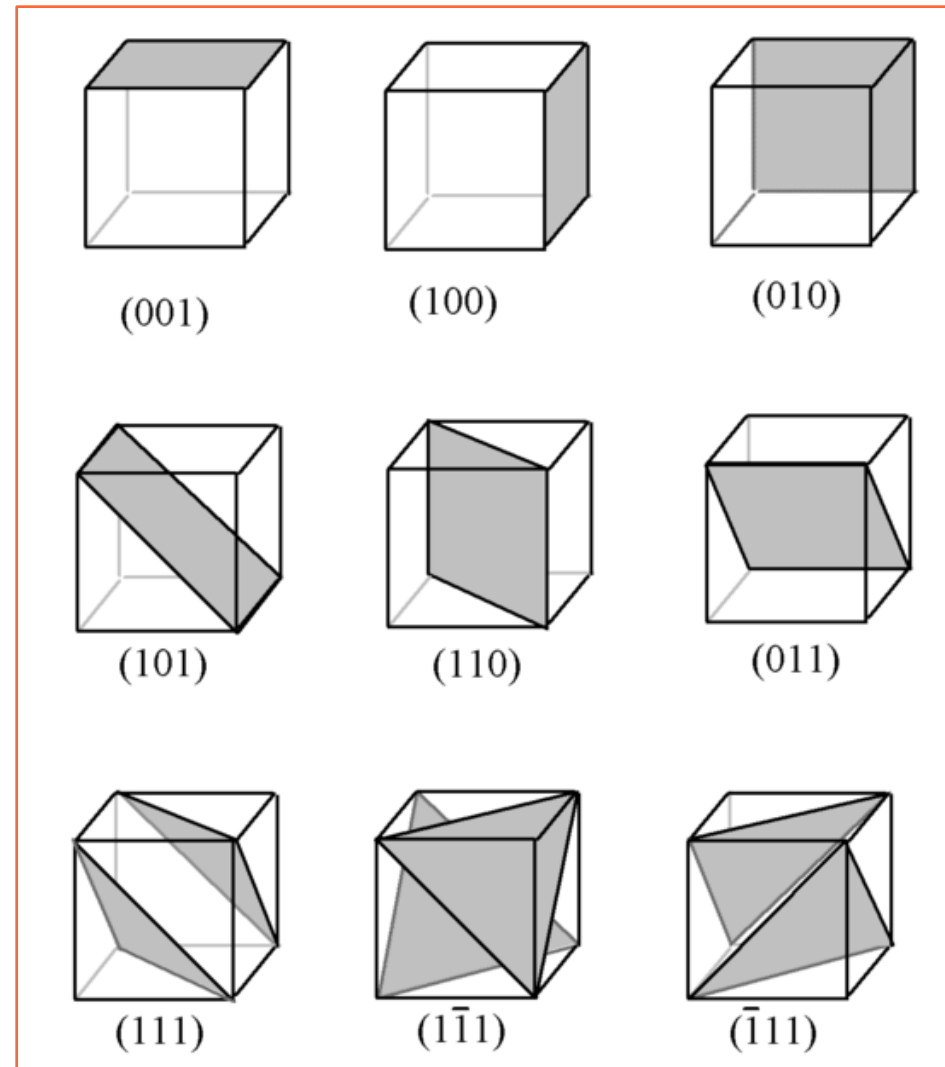
■ Example:

- ▶ Take the intercepts of the plane along the crystallographic axes, *e.g.* **2**, **1** and **3**.
- ▶ The reciprocal of the three integers are taken: **$1/2$** , **$1/1$** and **$1/3$** .
- ▶ Multiply by the smallest common denominator (in this case **6**):
3, **6** and **2**.
- ▶ The Miller indices of the plane are: **(362)**.



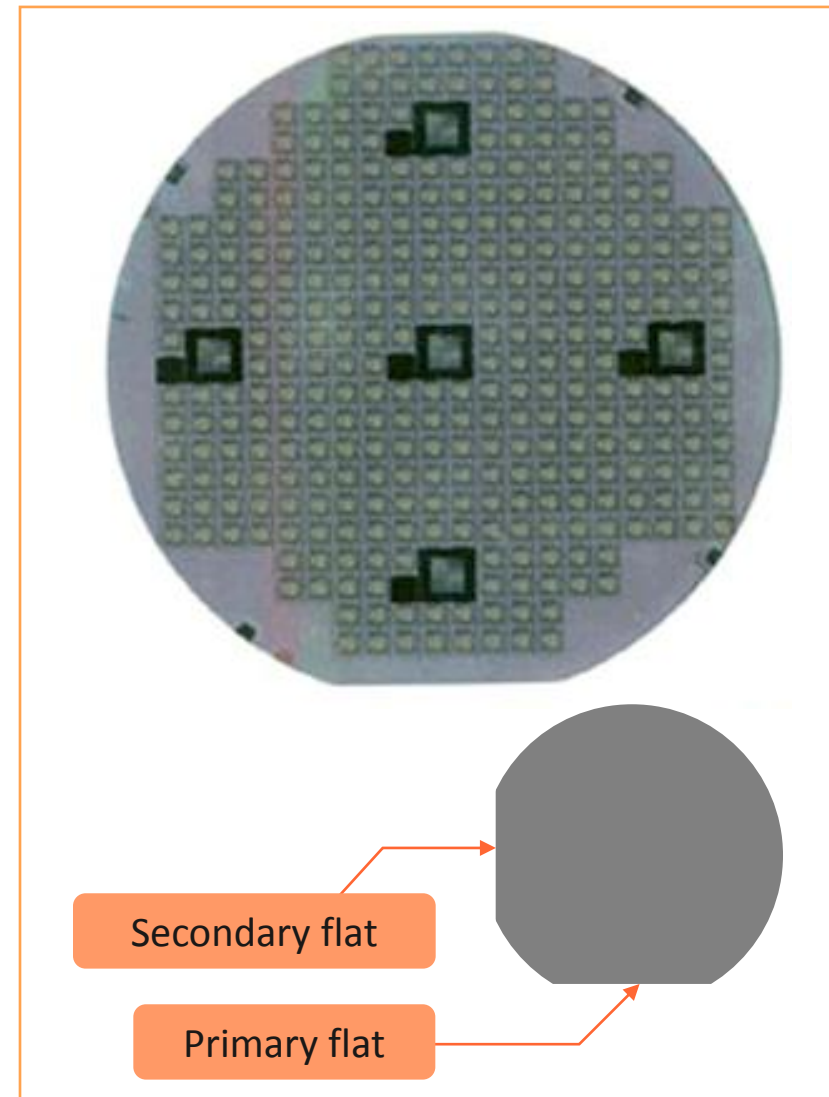
Các mặt tinh thể và định hướng

- **(abc)** ký hiệu cho một mặt tinh thể.
- **{abc}** ký hiệu một họ của các mặt tương đương.
- **[abc]** biểu thị hướng vuông góc đối với mặt (abc).
- **<abc>** ký hiệu một họ của các hướng tương đương.
- **{100}**, **{110}** và **{111}** là họ các mặt tinh thể quan trọng nhất đối với tinh thể Silic.



Các phiên silic tinh thể đơn

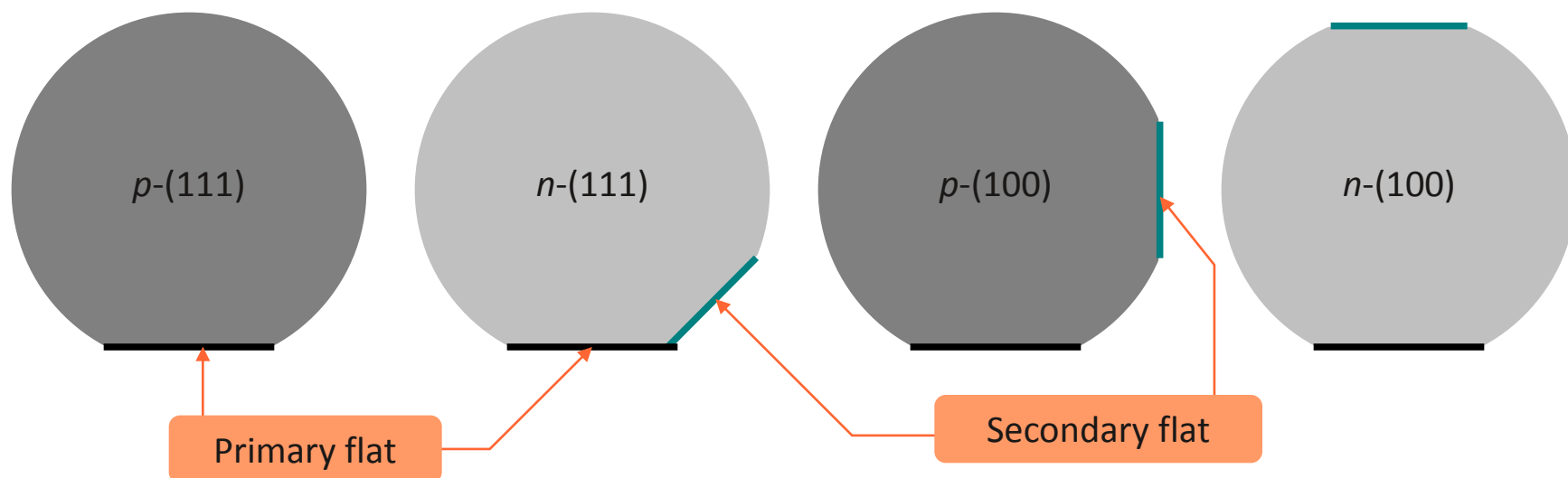
- **Mặt cắt chính và mặt cắt phụ biểu thị dạng pha tạp và định hướng bề mặt.**
- Đường kính đế trong chuẩn chế tạo hiện tại: từ 100 tới 300 mm.
- Chiều dày phiên trong chuẩn chế tạo hiện tại: từ 250 tới 600 μm .
- Định hướng bề mặt :
 - ▶ (100) for MOS and MEMS;
 - ▶ (110) for MEMS;
 - ▶ (111) for bipolar.



Các phiến 100 mm chuẩn

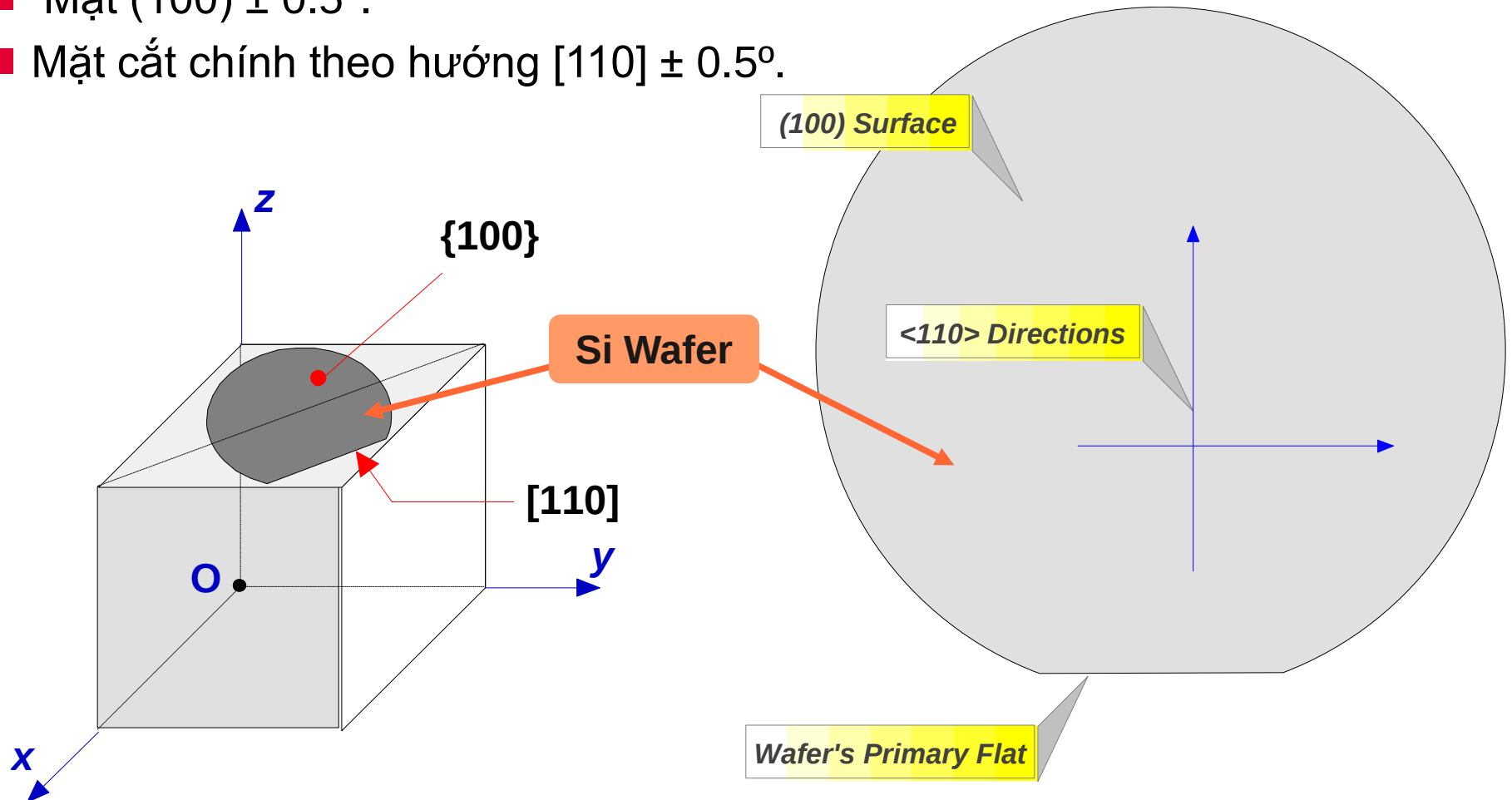
- Vị trí của mặt cắt chỉ ra định hướng bề mặt và dạng pha tạp.
- Mặt cắt chính trên phiến định hướng (100) và (110) dọc theo hướng [110].

Định hướng các mặt cắt đối với phiến 100 mm



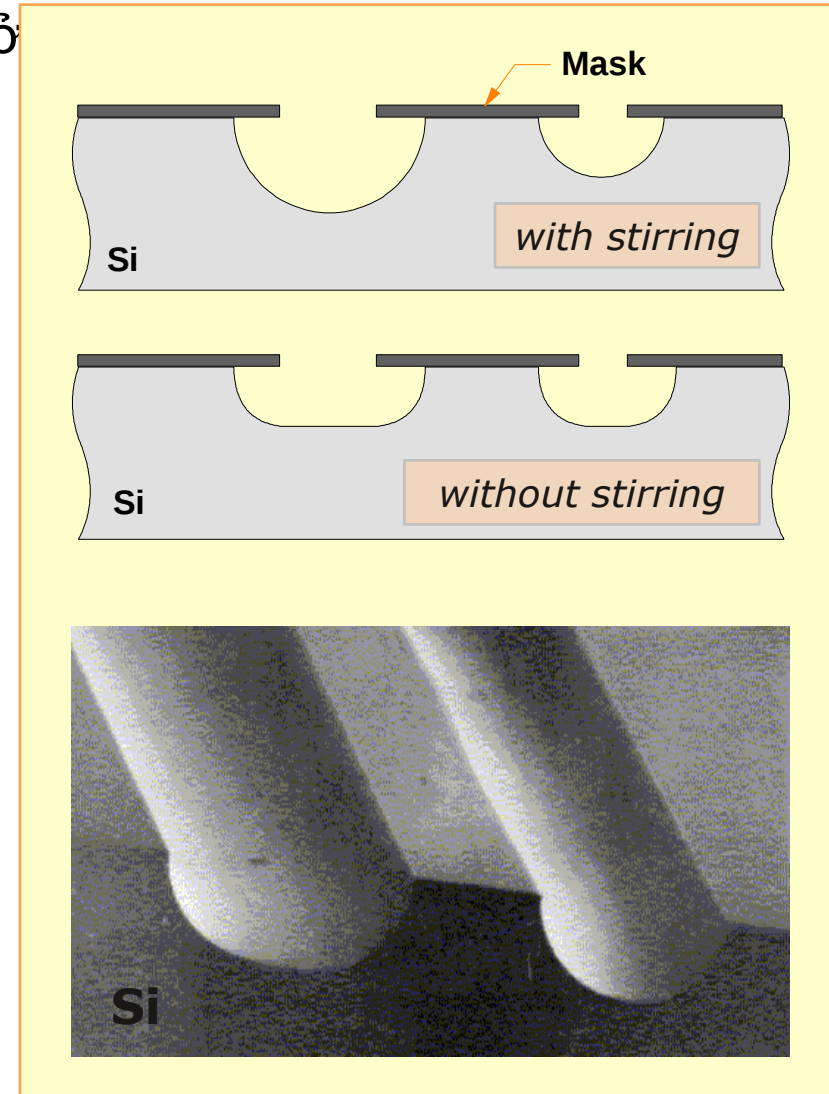
Các phiên được sử dụng trong MultiMEMS

- Phiên Si 150 mm, loại p.
- Mặt $(100) \pm 0.5^\circ$.
- Mặt cắt chính theo hướng $[110] \pm 0.5^\circ$.



Ăn mòn đẳng hướng Silic

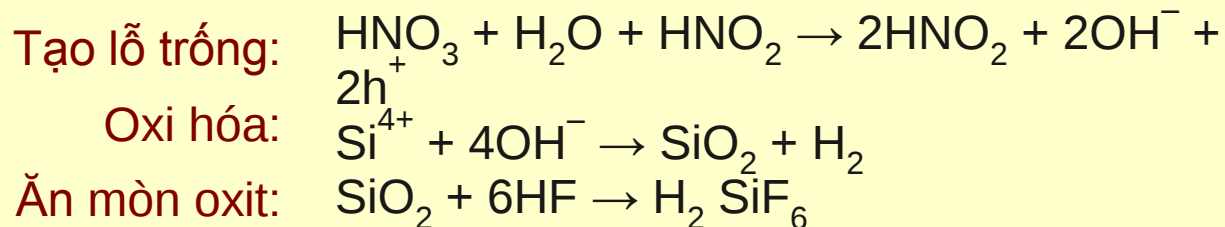
- Tất cả các hướng tinh thể được ăn mòn ở cùng một tốc độ.
- Các đặc trưng:
 - ▶ Các chất ăn mòn thường là các axit;
 - ▶ Nhiệt độ ăn mòn: 20... 50 °C;
 - ▶ Phản ứng bị giới hạn bởi khuếch tán;
 - ▶ Tốc độ ăn mòn rất cao (lên tới 50 $\mu\text{m}/\text{min}$);
 - ▶ Significant mask undercutting.
- Mặt nạ ăn mòn cần được lựa chọn cẩn thận:
 - ▶ Au/Cr or Si_3N_4 lắng đọng LPCVD làm mặt nạ có chất lượng tốt.
 - ▶ SiO_2 có thể được sử dụng làm mặt nạ cho ăn mòn nông.



Ăn mòn đẳng hướng Silic: Các chất ăn mòn

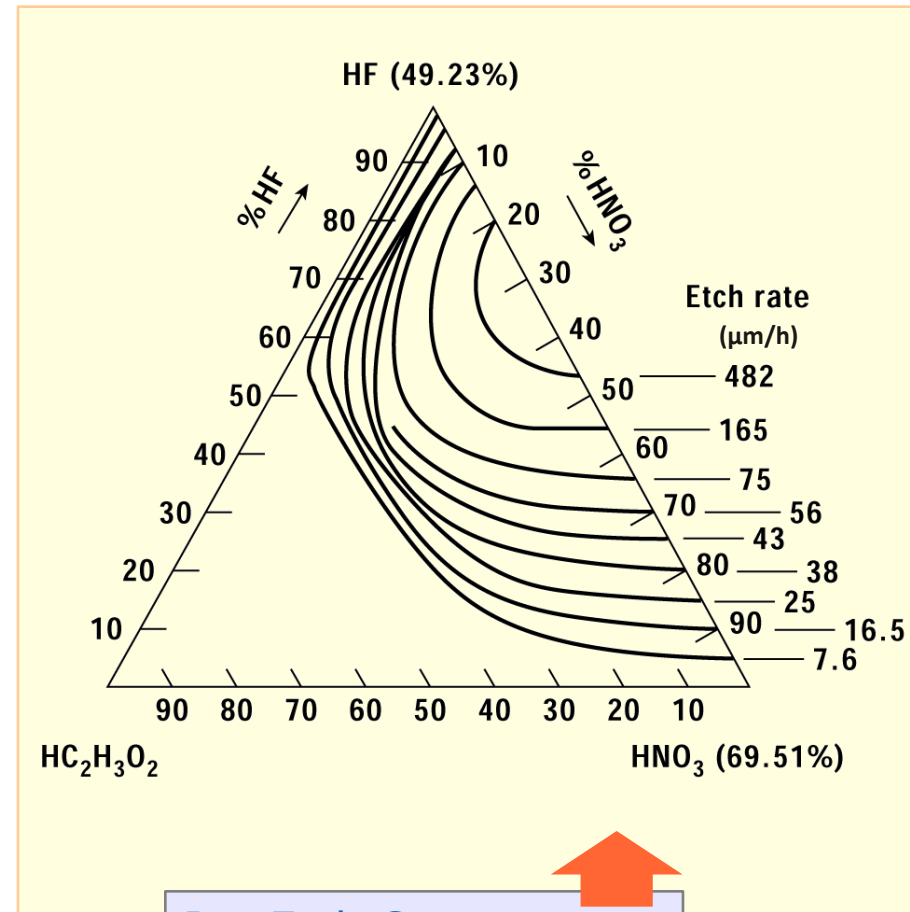
Chất ăn mòn (Diluent)	Thành phần	Nhiệt độ	Tốc độ ăn mòn [μm/min]
HF HNO ₃ CH ₃ COOH + H ₂ O	10 ml 30 ml 80 ml	22 °C	0.7... 3.0
HF HNO ₃ CH ₃ COOH + H ₂ O	25 ml 50 ml 25 ml	22 °C	40
HF HNO ₃ CH ₃ COOH + H ₂ O	9 ml 75 ml 30 ml	22 °C	7.0

Cơ chế



Ăn mòn Silic với HNA

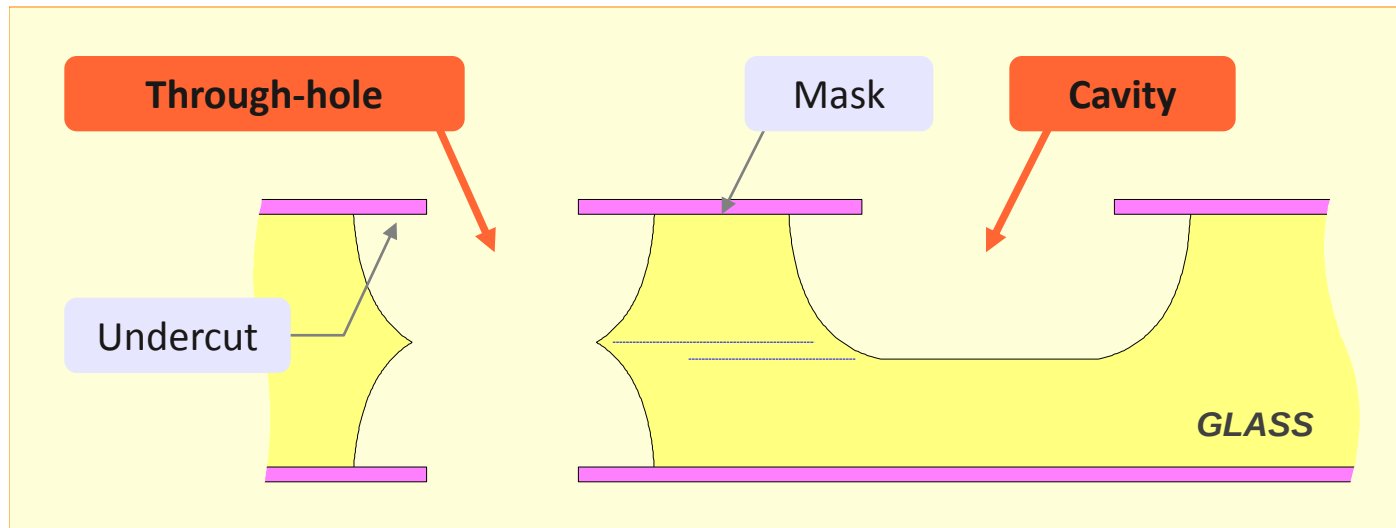
- **HNA**: hỗn hợp của
 - ▶ 49,23% **HF**,
 - ▶ 69,51% **HNO₃** và
 - ▶ Axit acetic (**CH₃COOH**) hoặc nước (**H₂O**) như chất pha loãng.
- **HNO₃** oxy hóa Silic, **HF** tẩy lớp oxit:
 - ▶ Tỷ lệ **HNO₃:HF** cao,
 - Ăn mòn bị giới hạn bởi quá trình tẩy lớp Oxit.
 - ▶ Tỷ lệ **HNO₃:HF** thấp
 - Ăn mòn bị giới hạn bởi quá trình tạo oxit.
- Pha loãng với nước hoặc axit acetic:
 - ▶ **CH₃COOH** thường được sử dụng bởi vì nó ngăn được sự phân ly của **HNO₃**.



Iso-Etch Curve
(from **Robbins et al.**)

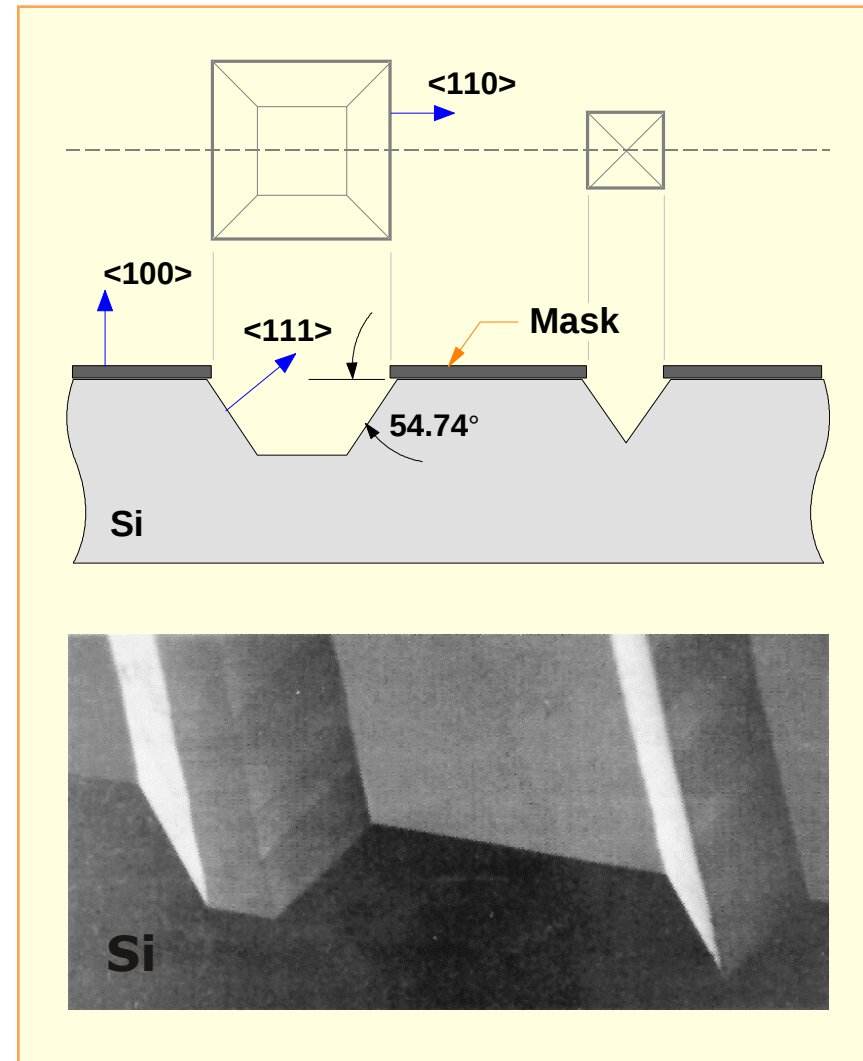
Ăn mòn dị hướng của thủy tinh

- Single- or double-side etching of glass wafers is achieved either by using **HF**-water solution or **HNA**.
- Typical *etch rate* for borosilicate glass in HNA: **1.9 $\mu\text{m}/\text{min}$** .
- Applications:
 - ▶ Etching cavities and through-holes;
 - ▶ Etching gas/fluid channels.

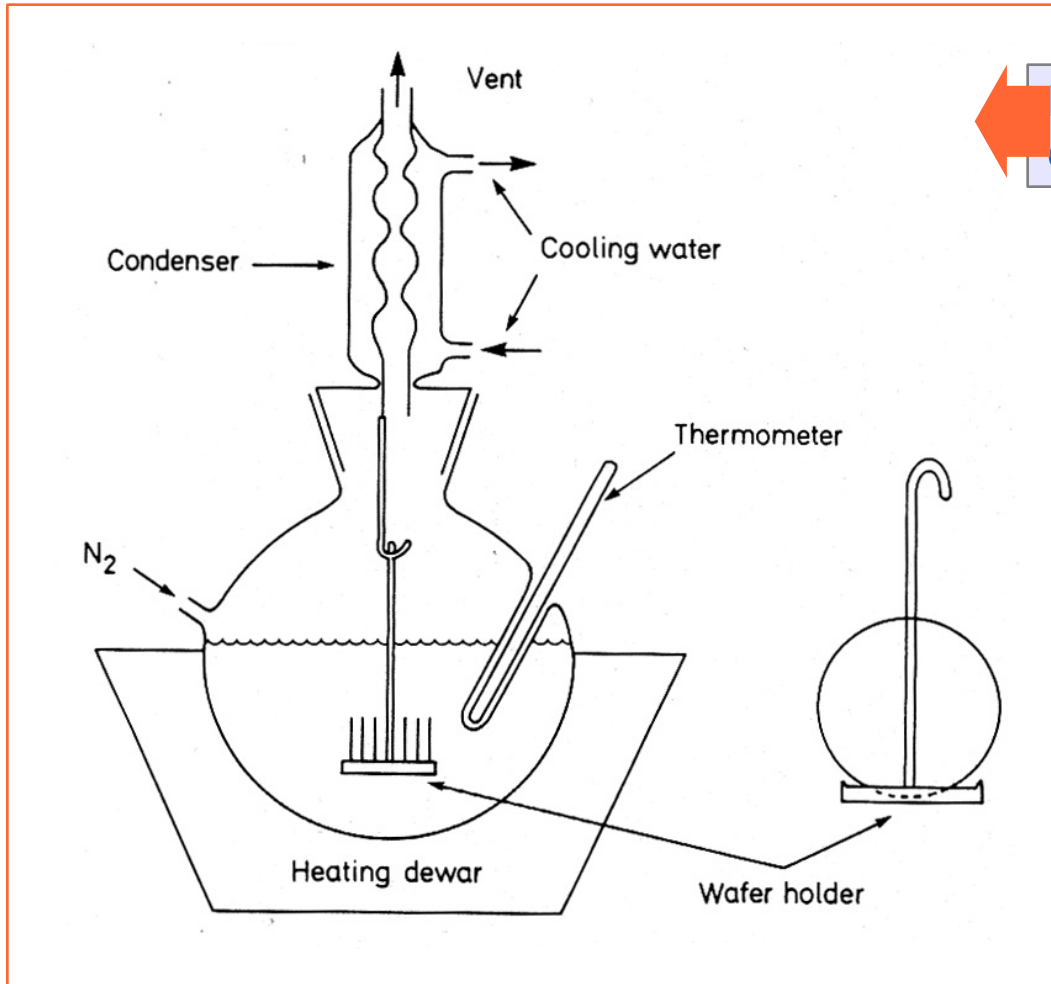


Ăn mòn dị hướng của Silic

- Các định hướng tinh thể được ăn mòn ở các tốc độ khác nhau.
- Các đặc trưng:
 - ▶ Các chất ăn mòn thường là kiềm;
 - ▶ Nhiệt độ ăn mòn: 85... 115 °C;
 - ▶ Reaction is rate-limited;
 - ▶ Tốc độ ăn mòn thấp (ca. 1 $\mu\text{m}/\text{min}$);
 - ▶ Ăn mòn ngang mask nhỏ.
- Mặt nạ ăn mòn được lựa chọn cẩn thận:
 - ▶ Si_3N_4 lắng đọng LPCVD làm vật liệu mask tốt;
 - ▶ SiO_2 có thể được sử dụng với một số chất ăn mòn.



Thiết lập hệ thống ăn mòn



Laboratory setup for wet chemical etching of silicon.

The principles for industrial manufacturing equipment are the same.

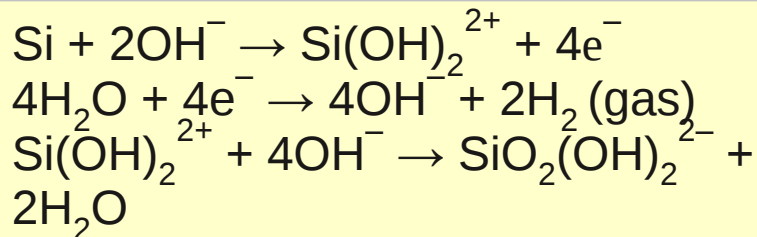
Chất ăn mòn dị hướng cho Si

Chất ăn mòn (Diluent)	Thành phần	Nhiệt độ	Tốc độ ăn mòn [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Tỷ lệ ăn mòn (100)/(111)	Vật liệu mặt nạ
Etylenediamine Pyrocathocol Water	750 ml 120 gr 100 ml	115 °C	0.75	35:1	SiO_2 Si_3N_4 metals
Etylenediamine Pyrocathocol Water	750 ml 120 gr 240 ml	115 °C	1.25	35:1	SiO_2 Si_3N_4 metals
KOH Water + Isopropyl	44 gr 100 ml	85 °C	1.4	400:1	SiO_2 Si_3N_4
TMAH Water + Isopropyl	220 gr 780 ml	90 °C	1.0	100:1	SiO_2 Si_3N_4

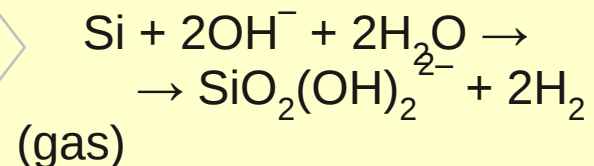
Hóa học của ăn mòn dị hướng

- Các giai đoạn của quá trình ăn mòn:
 - ▶ Vận chuyển các chất phản ứng tới bề mặt để silic;
 - ▶ Phản ứng bề mặt;
 - ▶ Vận chuyển các sản phẩm phản ứng ra xa từ bề mặt.
- Các thành phần ăn mòn cơ bản: Key etch ingredients:
 - ▶ Chất oxy hóa;
 - ▶ Chất ăn mòn oxit;
 - ▶ Chất pha loãng và môi trường vận chuyển.

CƠ chế

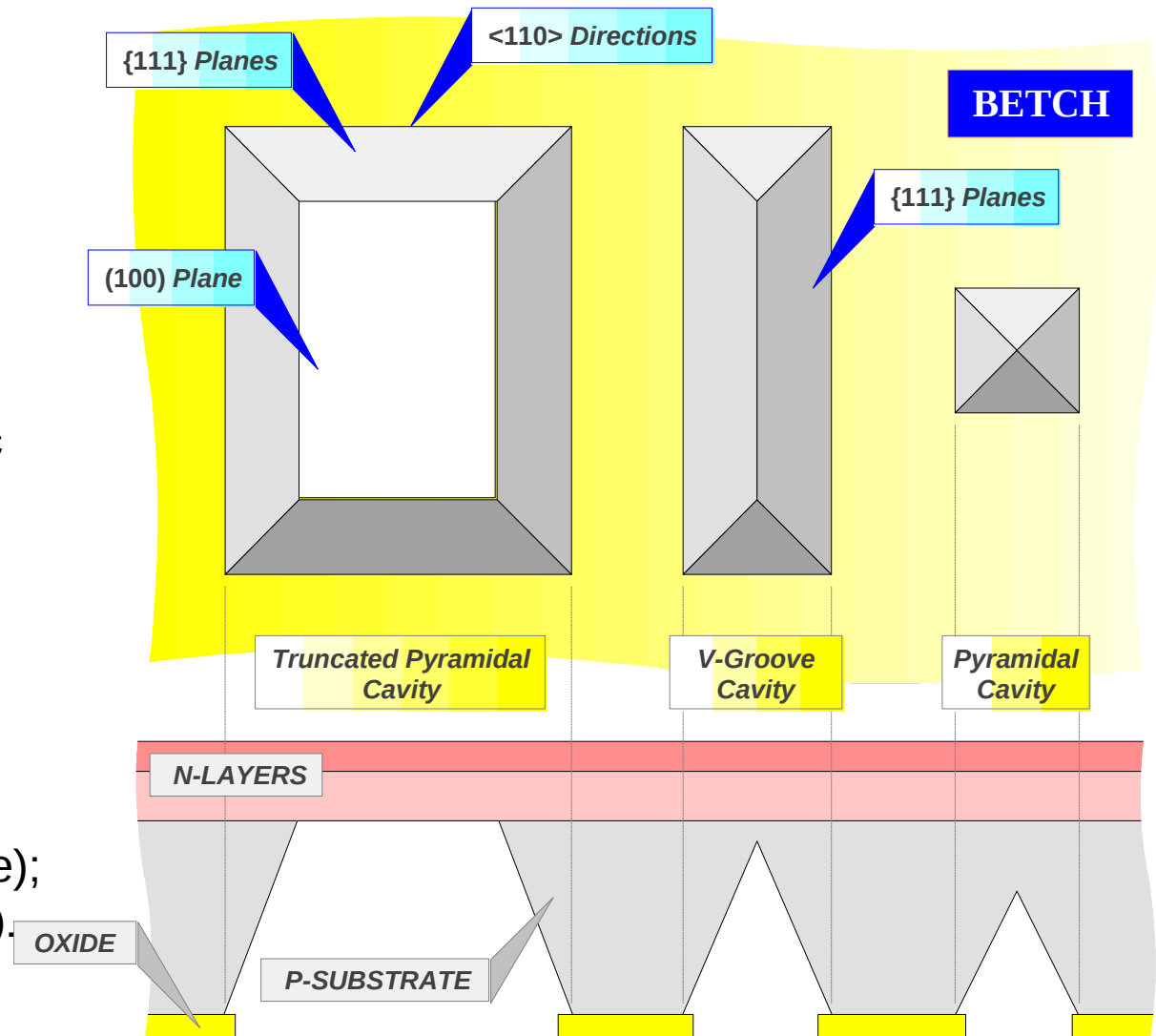


Overall:



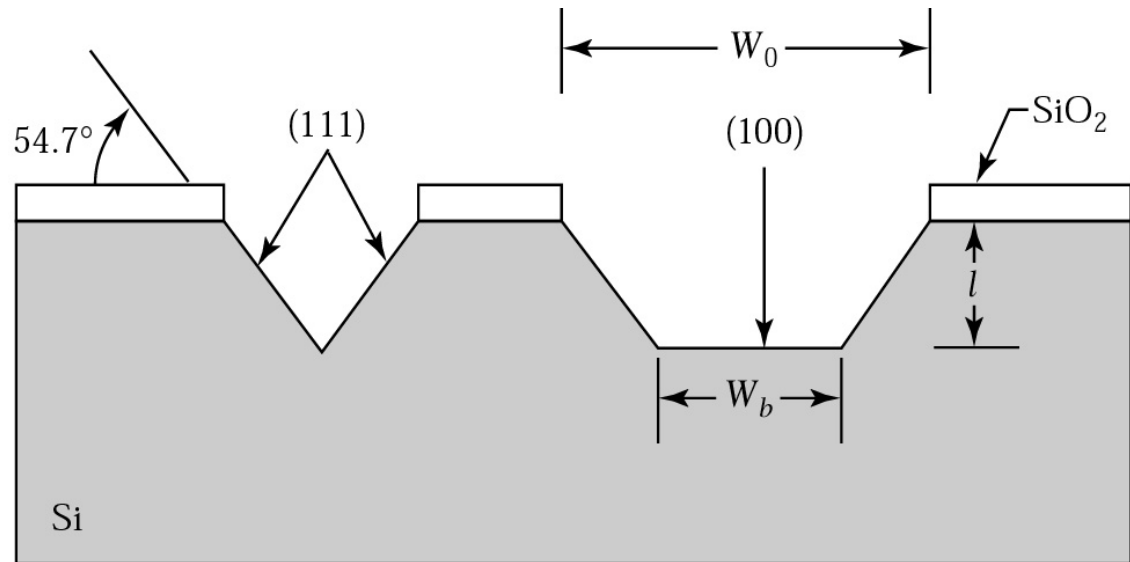
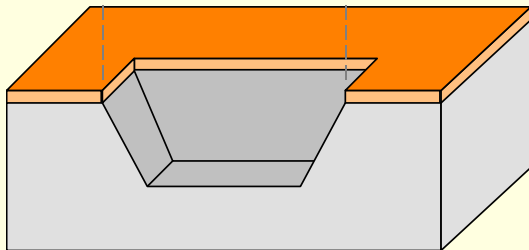
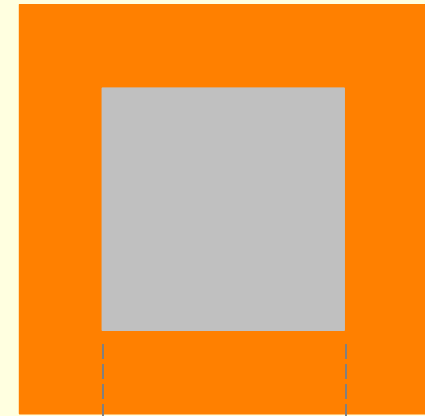
Ăn mòn dị hướng của phiến Si (100)

- Lỗ hổng được định nghĩa bởi:
 - ▶ Các mặt $\{111\}$
 - Các mặt bên ăn mòn chậm;
 - ▶ Các mặt đáy $\{100\}$ - Mặt ăn mòn nhanh.
- Hình dạng cuối cùng của lỗ hổng phụ thuộc vào:
 - ▶ Hình học của mặt nạ;
 - ▶ Thời gian ăn mòn.
- Hình dạng của hốc ăn mòn:
 - ▶ Kim tự tháp cắt ngọn (Truncated pyramid);
 - ▶ Rãnh chữ V (V-groove);
 - ▶ Kim tự tháp (Pyramid).



Hình học lỗ hổng cho phiến (100)

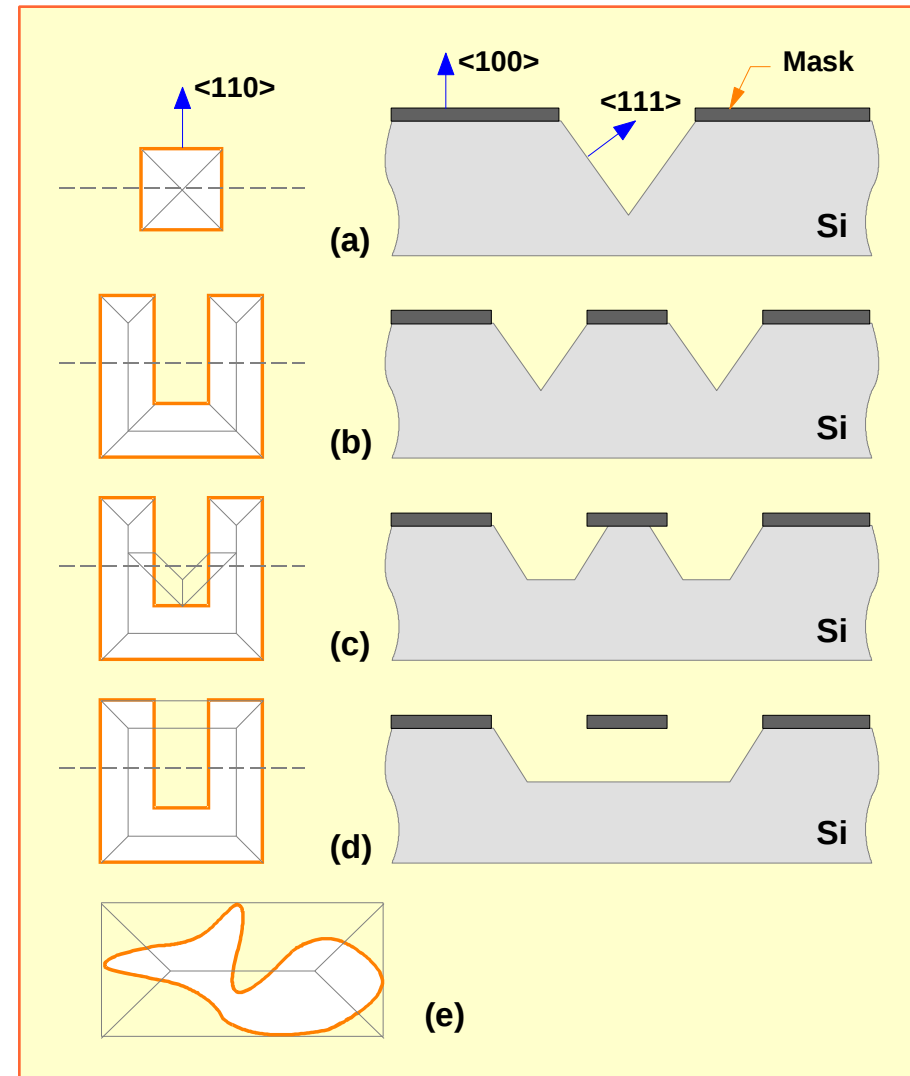
Hố ăn mòn định hướng trong phiến Si **(100)** với cửa sổ mặt nạ mở ăn mòn dạng hình vuông định hướng song song với các hướng e **$\langle 110 \rangle$** .



$$W_b = W_0 - 2 \cdot l \cdot \cot(54.7^\circ)$$

Ăn mòn ngang Mask

- **(a)** is a pyramidal pit bounded by the $\{111\}$ planes.
- **(b)** is a type of pit expected from *slow undercutting* of convex corners.
- **(c)** is a type of pit expected from *fast undercutting* of convex corners.
- In **(d)**, further etching of **(c)** produces a cantilever beam suspended over the pit.
- **(e)** illustrates the general rule for undercutting assuming a sufficiently long etching time.



Ảnh hưởng của Si (110)

■ Cavity defined by:

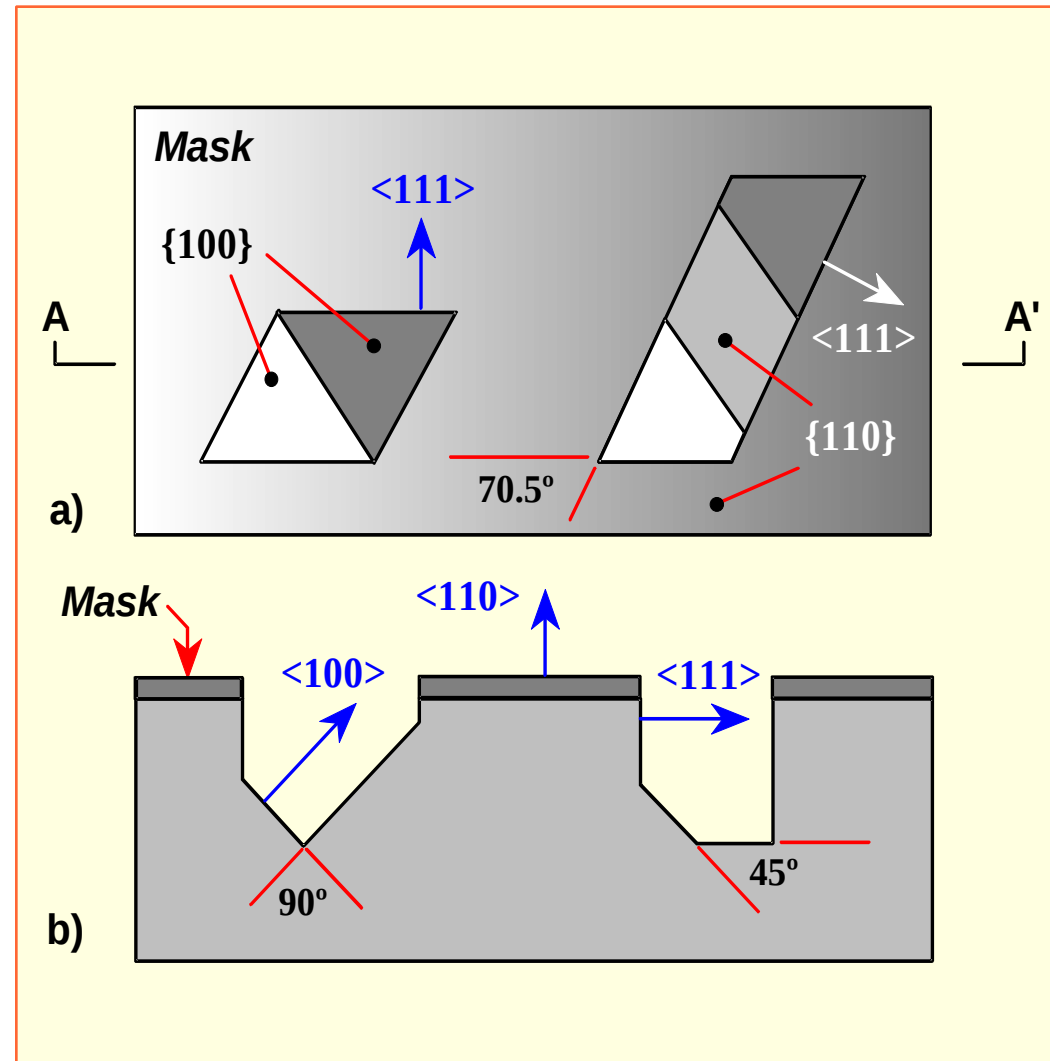
- ▶ $\{111\}$ walls
 - slow-etching planes;
- ▶ $\{110\}$ floor
 - fastest-etching plane;
- ▶ $\{100\}$ bottom side walls
 - fast-etching planes;

■ Final shape of cavity depends on:

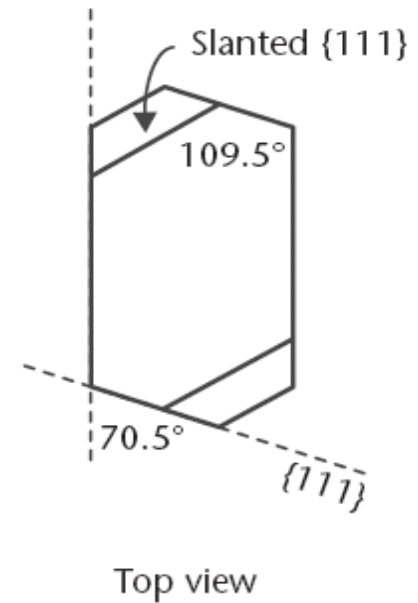
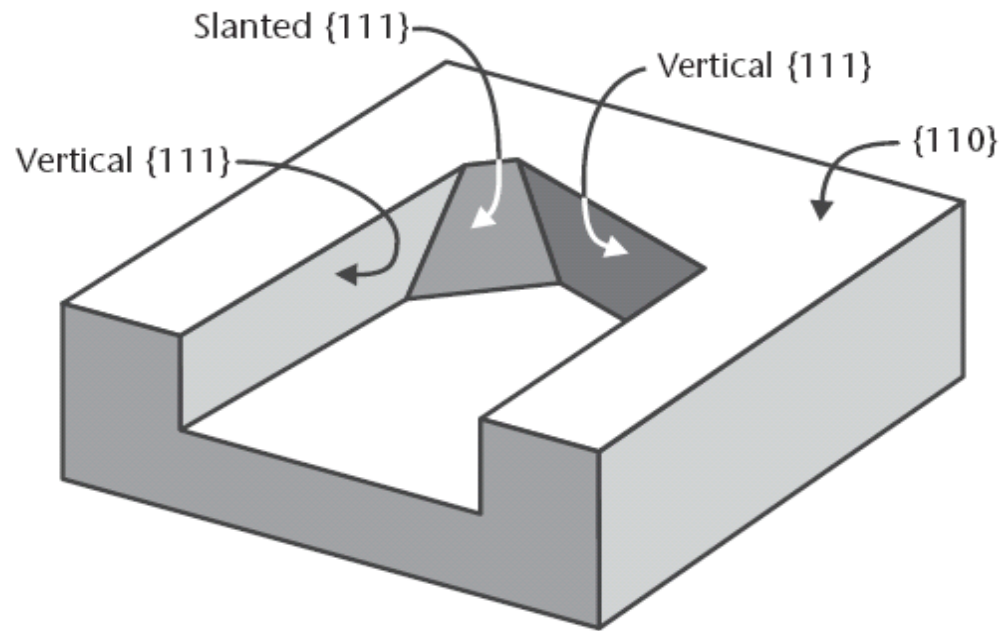
- ▶ Mask geometry;
- ▶ Etching time.

■ Cavity shape:

- ▶ Rhombic prisms;
- ▶ Hexahedric prisms.



Hình học lỗ hổng cho phiên Si (110)



Ăn mòn chọn lọc

Các phương pháp cho ăn mòn chọn lọc

■ Các phương pháp ăn mòn dựa trên điều khiển thời gian ăn mòn:

- ▶ Tính toán thời gian ăn mòn được cần trên cơ sở tốc độ ăn mòn.
 - Dễ dàng, nhưng là một phương pháp có độ chính xác không cao, bởi vì tốc độ ăn mòn thay đổi theo điều kiện hóa học của chất ăn mòn và các yếu tố hình học hạn chế sự khuấy động của ăn mòn.
Độ chính xác: $\pm 20 \mu\text{m}$.
- ▶ Kiểm tra độ sâu của hốc được ăn mòn trong các khoảng thời gian thích hợp cho đến khi đạt được độ sâu mong muốn.
 - Mất nhiều thời gian, nhưng độ chính xác được cải thiện. Time consuming, but improved accuracy. Độ sâu khác không đều từ hốc ăn mòn này đến hốc ăn mòn do các yếu tố hóa học và hình học vẫn còn là một vấn đề.
Độ chính xác: $\pm 10 \mu\text{m}$.

■ Các kỹ thuật ăn mòn chọn lọc hóa học:

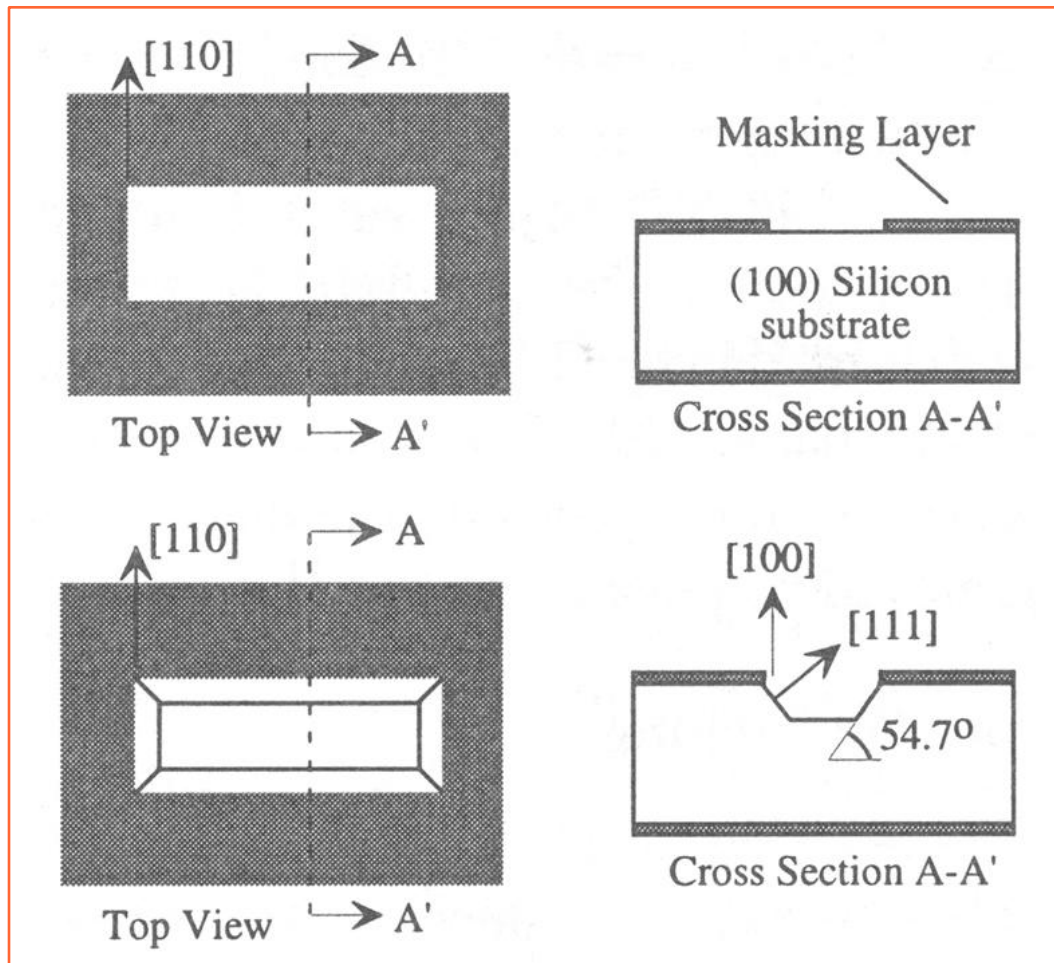
- ▶ Quá trình ăn mòn dừng lại khi đạt đến một lớp tro đối với chất ăn mòn hóa học.
 - Độ chính xác: $\pm 3 \mu\text{m}$.

■ Các kỹ thuật ăn mòn chọn lọc điện hóa:

- ▶ Ăn mòn dừng trên các chuyển tiếp pn được phân áp ngược.
 - Độ chính xác: $\pm 1 \mu\text{m}$.

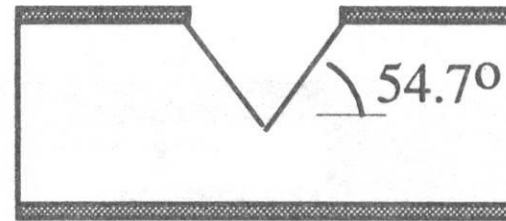
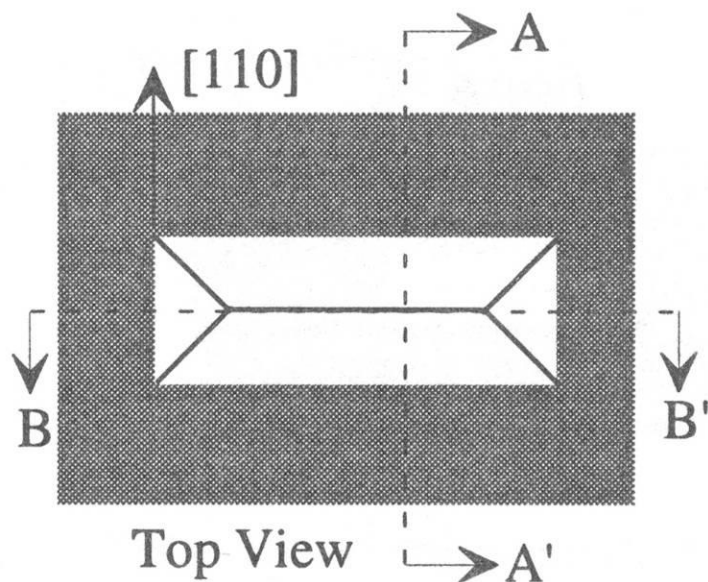
Ăn mòn định thời

- Ví dụ về ăn mòn dừng ở một chiều sâu bất kỳ, thể hiện mặt đáy bằng phẳng.

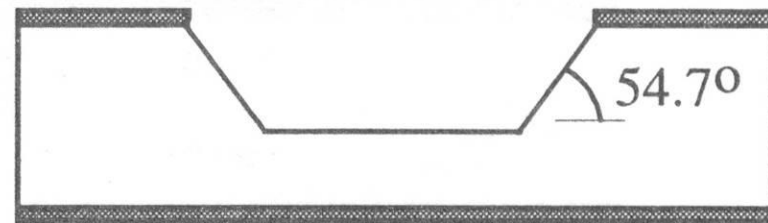


Ăn mòn dừng bởi các mặt $\{111\}$

- Ví dụ về ăn mòn dừng bởi các mặt $\{111\}$ giao với nhau, thể hiện một rãnh hình chóp.



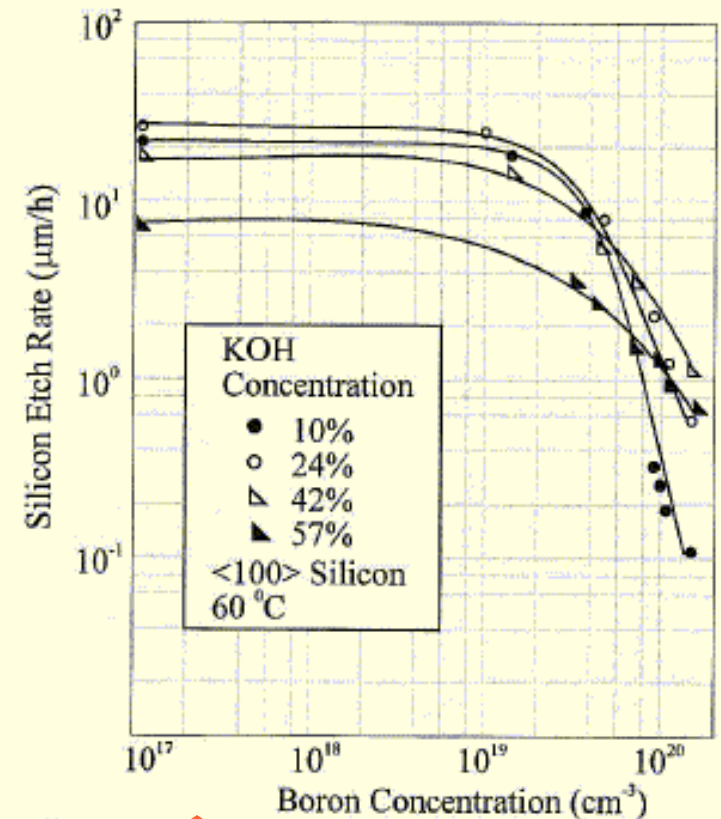
Cross Section A-A'



Cross Section B-B'

Kỹ thuật ăn mòn dừng Bo

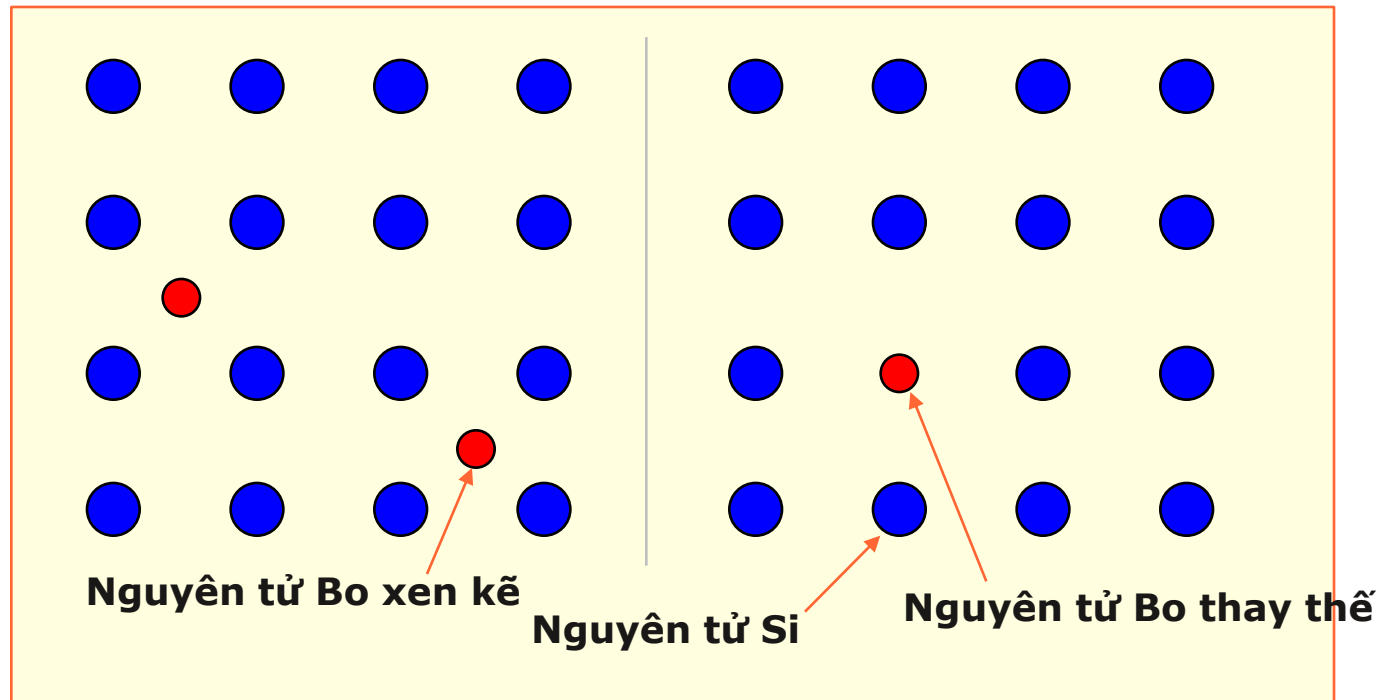
- *Ăn mòn chọn lọc hóa học:*
 - ▶ Etch rate depends on boron concentration.
 - ▶ Ăn mòn dừng nếu nồng độ Bo lớn hơn $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.
- Lớp dừng ăn mòn Bo được chế tạo bằng:
 - ▶ By *diffusion* deposition, *implantation* or both;
 - ▶ On the *opposite surface* of the wafer with respect to the etch cavity.



Boron-dependent etch rate of silicon (from **Seidel et al.**)

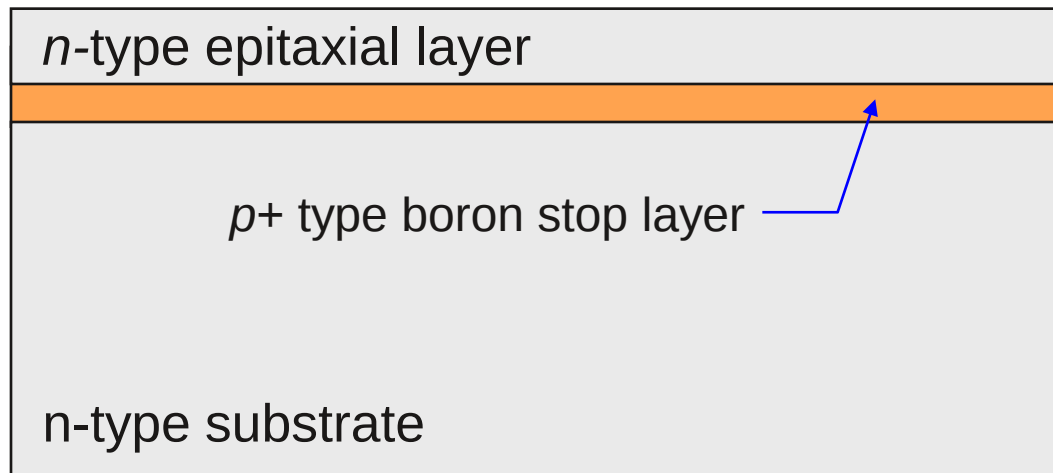
Cơ chế dừng ăn mòn Boron

- Liên kết xen kẽ đòi hỏi nhiều năng lượng hơn để được phá vỡ.
- Các điện tử được cung cấp bởi chất ăn mòn tái hợp với các lỗ trong khối, thay vì tham gia vào phản ứng hóa học.



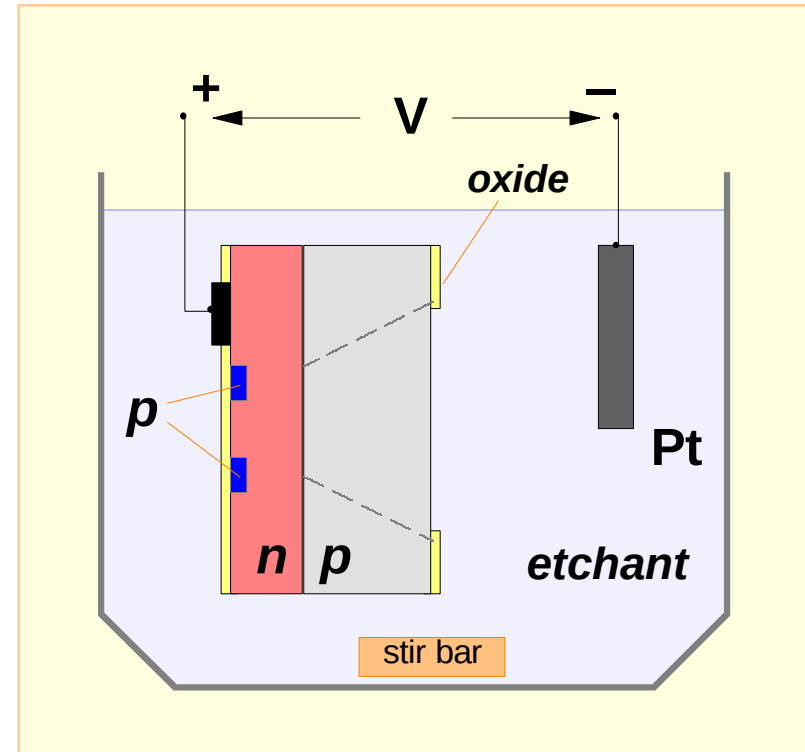
Các hạn chế của ăn mòn dừng Bo

- Điện tử không thể được tích hợp trong lớp dừng boron.
- ▶ *Giải pháp*: lắng đọng một lớp epitaxi trên lớp ăn mòn dừng, với nồng độ pha tạp tương tự như vật liệu để cho các linh kiện tích hợp.
- ▶ Điều khiển pha tạp tự động của lớp epitaxi là một thách thức.

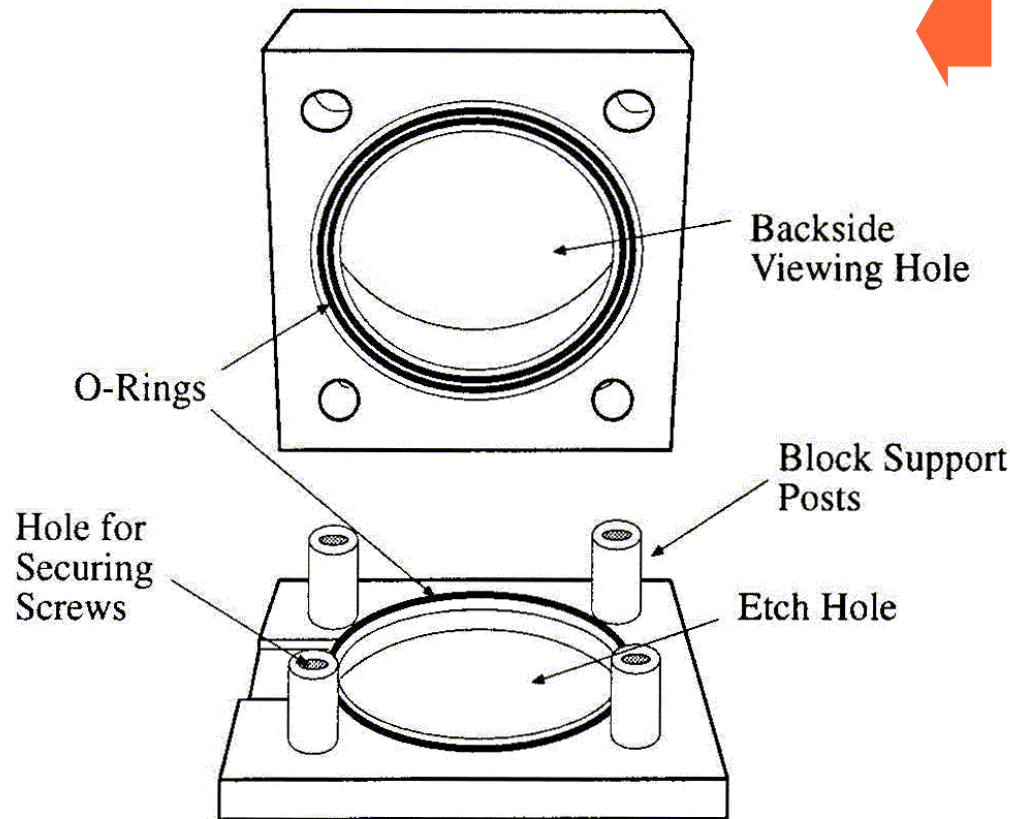


Dùng ăn mòn điện hóa (ECES)

- Ăn mòn chọn lọc điện hóa :
 - ▶ Tốc độ ăn mòn phụ thuộc vào thế năng áp dụng.
 - ▶ Ăn mòn dừng nếu điện áp tác dụng vượt quá giá trị ngưỡng, được gọi là thế năng thụ động.
 - ▶ Vật liệu pha tạp thấp, cả dạng p - và dạng n , có thể được thụ động hóa:
 - Được sử dụng như là để cho các thành phần tích hợp như các áp điện trở.
- Độ chính xác cao: $\pm 1 \mu\text{m}$:
 - ▶ Đạt được bằng sử dụng các kỹ thuật cấy và khuếch tán được điều khiển tốt.
- **KOH** và **TMAH** có thể được sử dụng:
 - Both avoid the health dangers of EDP.



Dữ kiện cho ECES

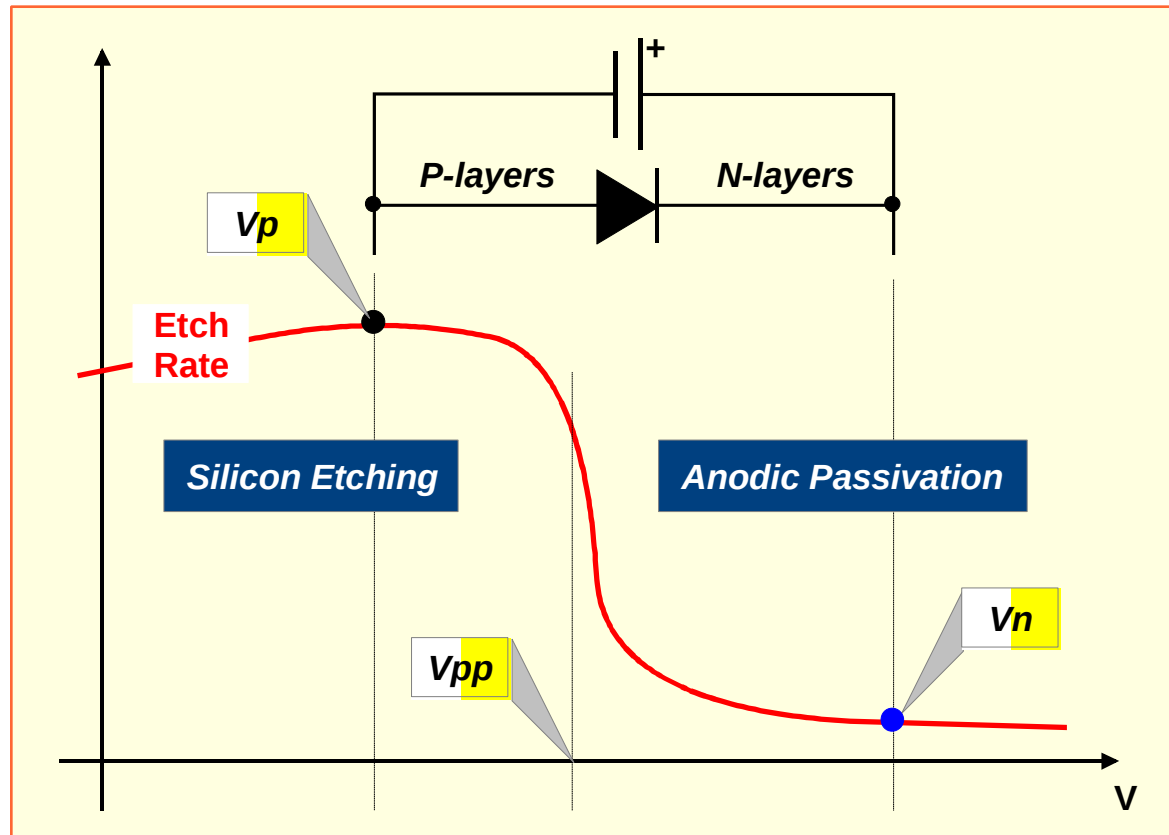


A practical way to make a wafer holder to be used for electro-chemical selective etching.

The principles for industrial manufacturing equipment are the same.

Cơ chế ăn mòn dừng điện hóa

- Ăn mòn dừng đạt được bằng cách phân áp ngược các chuyển tiếp pn.
- More in the **Bulk Silicon Etching** tutorial...



ECES cho MultiMEMS

■ Ăn mòn dừng điện hóa cho phép 3 chiều dày khác nhau:

▶ Chiều dày đế ($400\text{ }\mu\text{m}$)

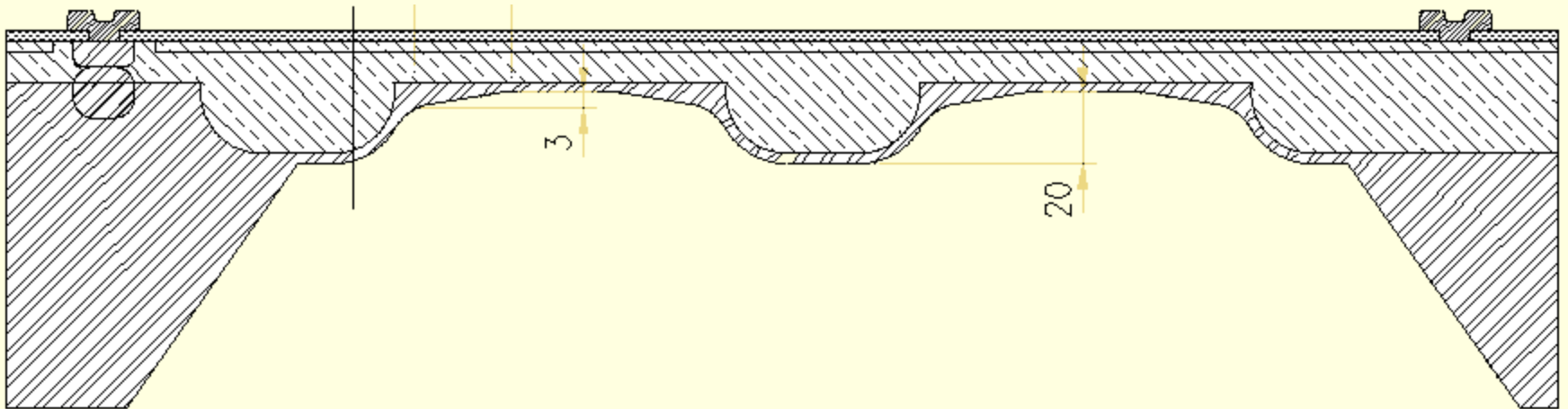
□ Cho chế tạo các khối gia trọng nặng;

▶ Chiều dày lớp epitaxi ($3\text{ }\mu\text{m}$)

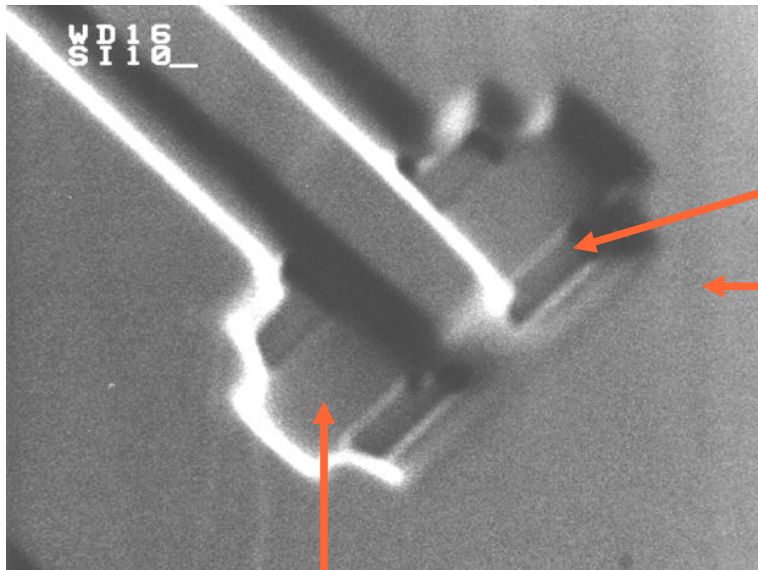
□ Cho chế tạo màng mỏng và lò xo;

▶ *Chiều dày giếng N* ($23\text{ }\mu\text{m}$)

□ Cho chế tạo màng dày, khối gia trọng, bosses...



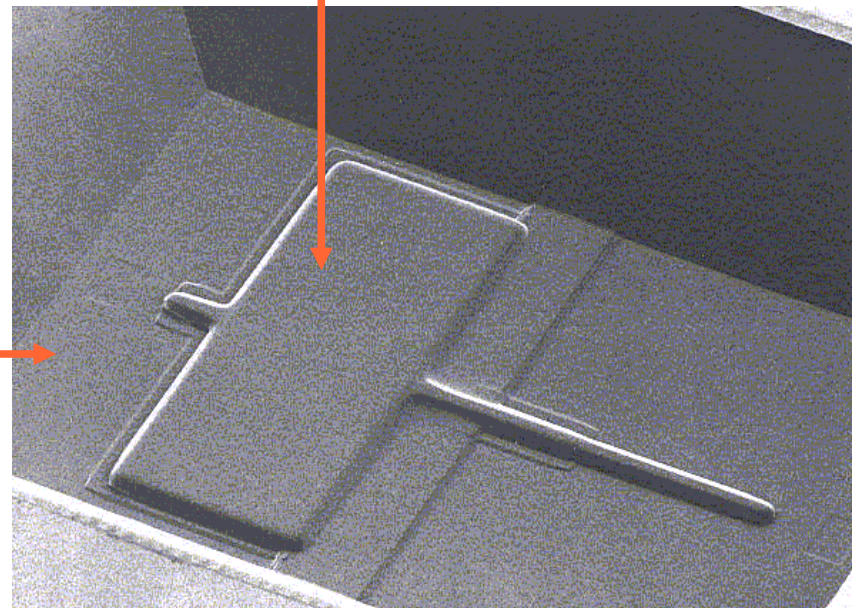
Ăn mòn dừng trên các chuyển tiếp đa mức (Etch-Stop on Multi-Level Junctions)



Màng rất mỏng

Màng dày
(Mass/Well)

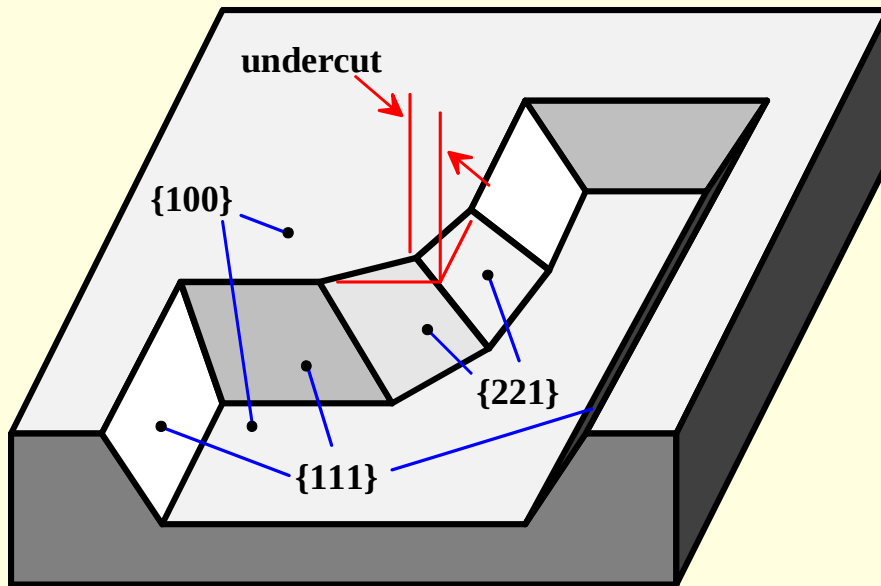
Màng mỏng



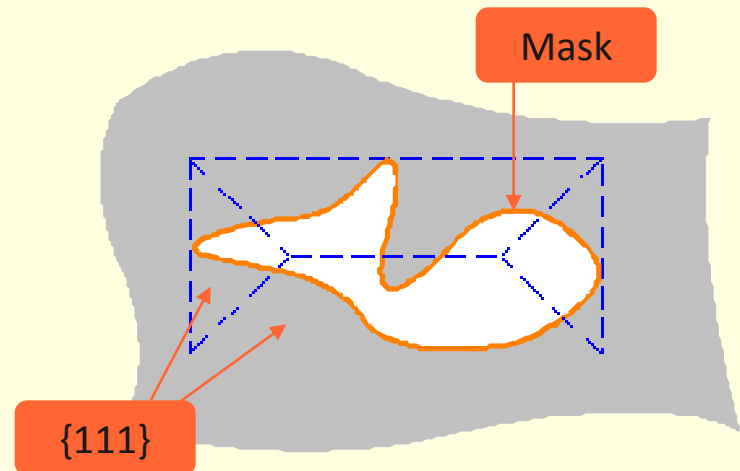
Các góc lồi

Ăn mòn ngang các góc lồi

- Tốc độ ăn mòn cao của các mặt chỉ số cao:
 - ▶ Ăn mòn ngang mạnh các góc lồi;
 - ▶ Kim tự tháp cắt ngắn hoặc rãnh chữ V là hốc ăn mòn cùng.

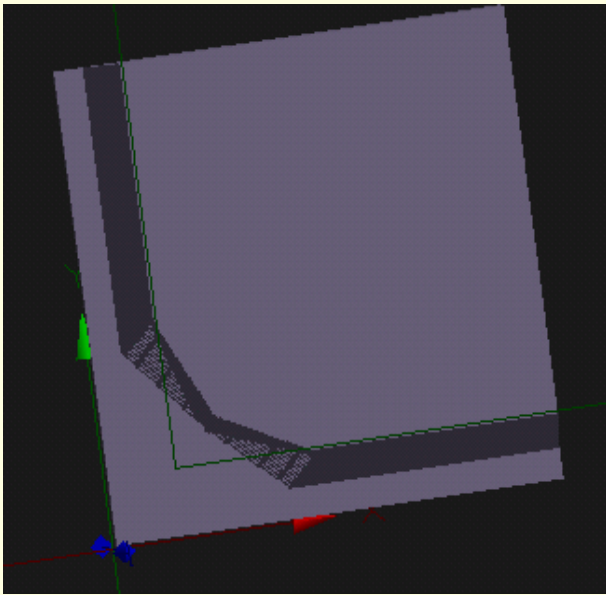


Mask will be undercut until $\{111\}$ planes are exposed.

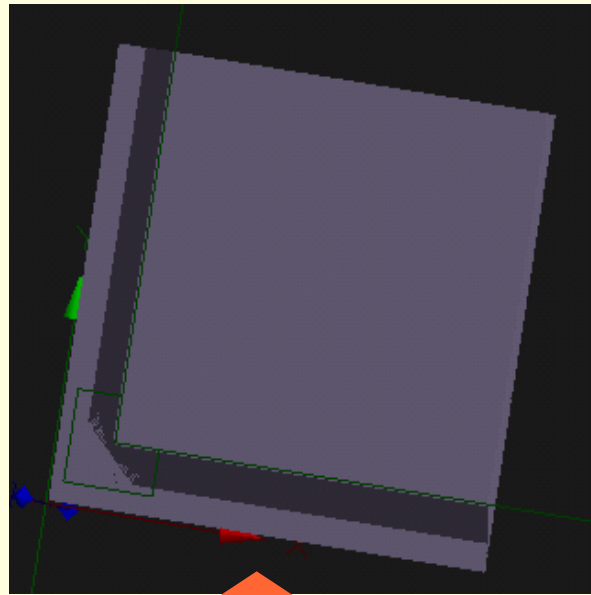


Bù góc ăn mòn

Ăn mòn không có cấu trúc bù góc



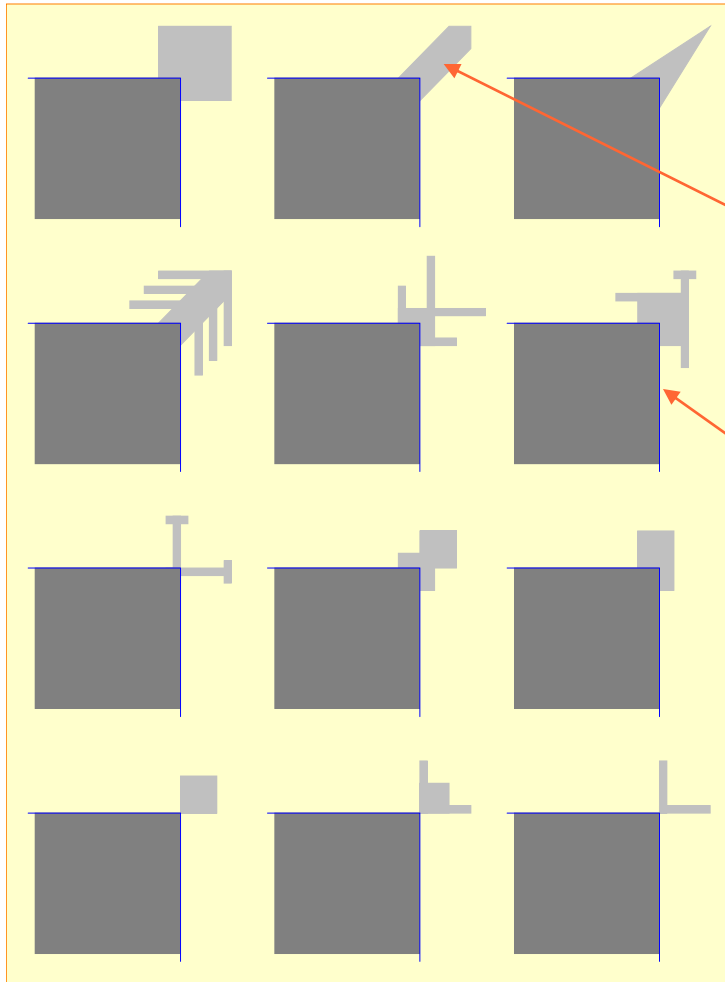
Ăn mòn với cấu trúc bù góc



Corner Compensation in Silicon
(from **Gupta** *et al.*)

Corner compensation of mask is difficult to establish as a repeatable process; highly dependant on etching parameters.

Các cấu trúc bù góc

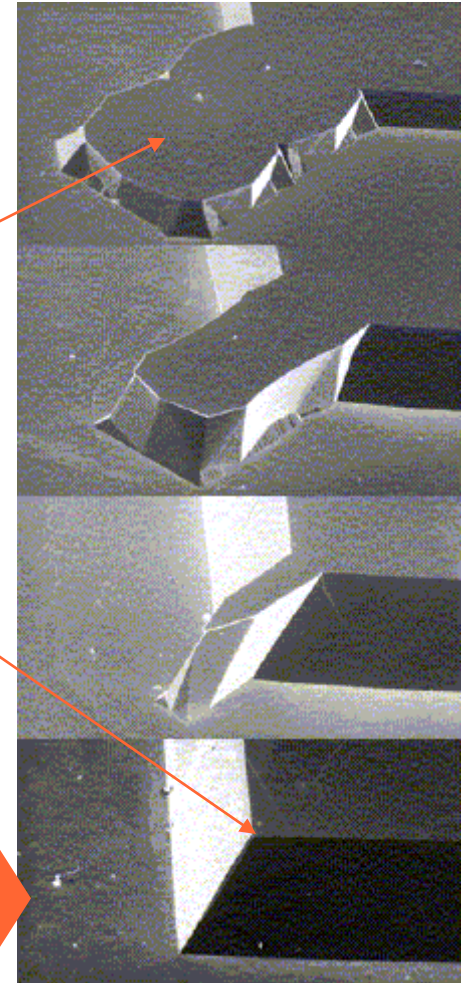


Cấu trúc bù góc

Kết quả mong muốn

Một phương pháp bù góc đơn giản để bù góc lồi trong ăn mòn dị hướng ướt

(from **Wei Fan** *et al.*)



Các thiết kế với các góc ăn mòn ngang

Designing with Undercut Corners

