

7 Plasma Basic

Objectives

- 列出電漿(plasma)的三種主要成分
- 列出電漿中的主要三種碰撞
- 說明平均自由路徑(mean free path)
- 說明在蝕刻製程及化學氣相沉積(CVD)中使用電漿的好處
- 列出至少兩種高密度電漿系統

Topics of Discussion

- What is plasma?
- Why use plasma?
 - 離子轟擊 (Ion bombardment)
- Application of plasma process

Applications of Plasma

- 化學氣相沉積(CVD)
- 蝕刻(Etch)
- 物理氣相沉積(PVD)
- 離子轟擊(Ion Implantation)
- 光阻剝除(Photoresist strip)
- 清潔製程機台的反應室

What Is Plasma

- 電漿是具有等量的正電荷和負電荷的離子氣體(ionized gas)
- 更精確的定義：電漿是有著帶電與中性粒子之準中性的氣體即這些粒子的集體行為
- 例如：
太陽, 火焰, 螢光燈(neon light), 等

Components of Plasma

- 電漿是由中性原子或分子, 負電(電子)和正電(離子)所構成
- 幾乎中性： $n_i \approx n_e$
- 游離率 (Ionization rate):
$$\eta \approx n_e / (n_e + n_n)$$

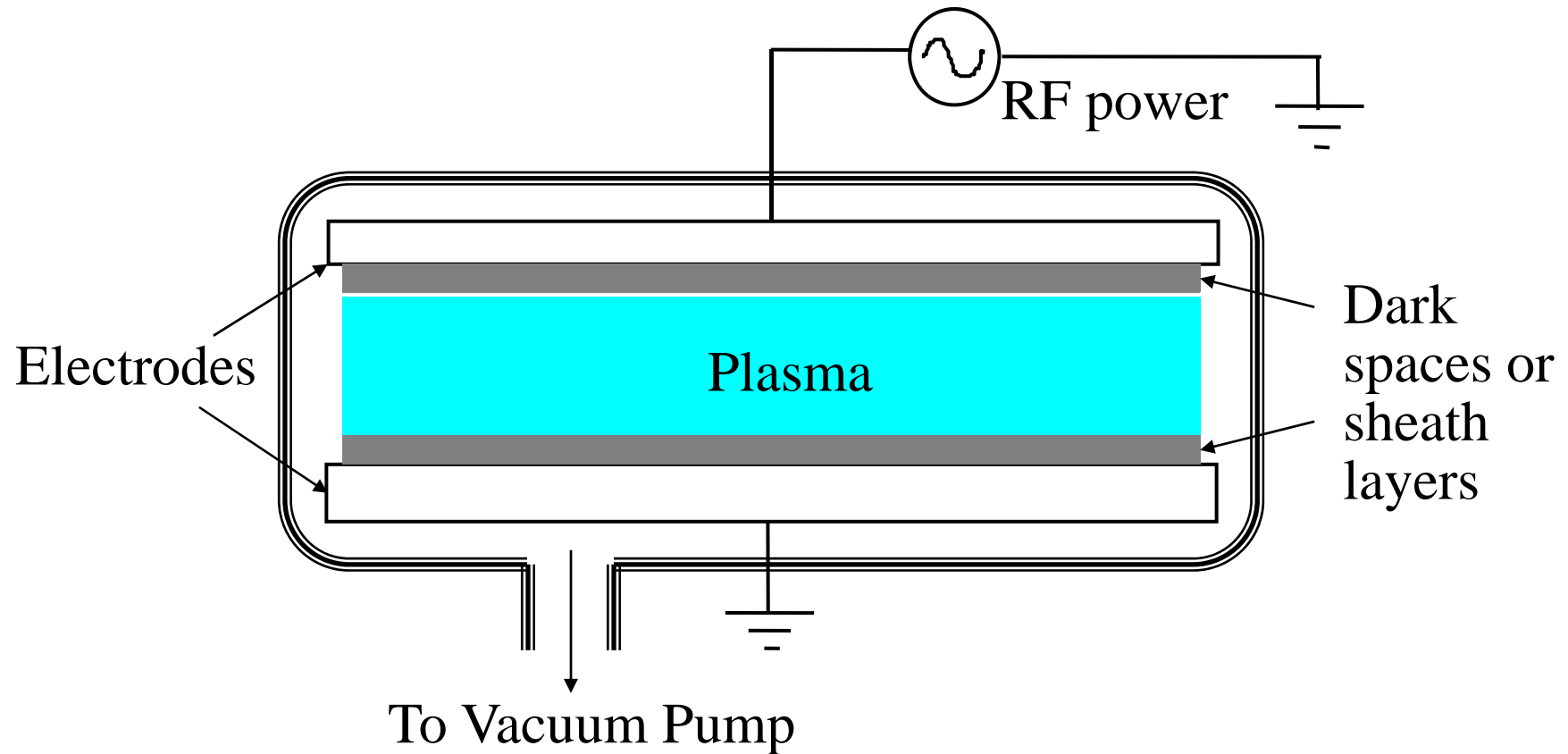
Ionization Rate

- 電漿的游離率主要取決於電子能量
- 在大多數的電漿製程反應室, 游離率小於0.001%.
- 高密度電漿(HDP)源的游離率高出很多, 大約1%.
- 太陽中心的游離率為~100%.

Neutral Gas Density

- Idea gas
 - 1 mole = 22.4 Litter = $2.24 \times 10^4 \text{ cm}^3$
 - 1 mole = 6.62×10^{23} molecules
- At 1 atm, gas density is $2.96 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
- At 1 Torr, gas density is $3.89 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- At 1 mTorr, gas density is $3.89 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
- RF(射頻)plasma has very low ionization rate

Parallel Plate Plasma System



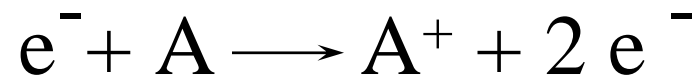
Generation of a Plasma

- 需要外界的能量
- 最普遍的是射頻(Radio frequency ,RF)電漿源
- 在真空系統中產生穩定的射頻電漿

Ionization

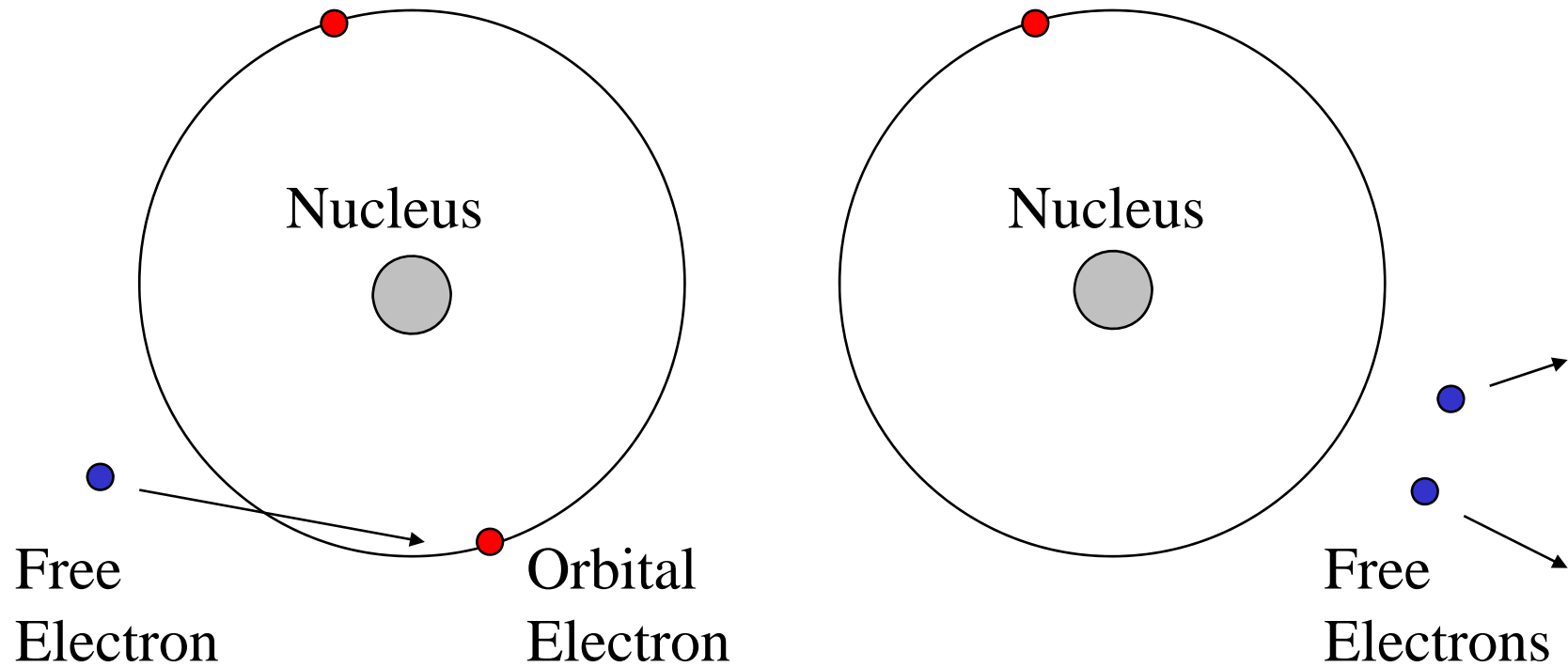
離子化

- 中性的原子或分子相碰撞
- 撞出軌道上的電子



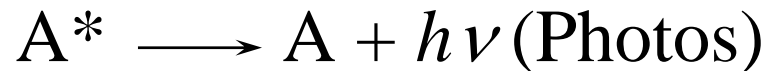
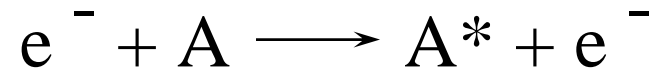
- 離子化(Ionization)碰撞產生電子和離子
- 維持穩定的電漿

Illustration of Ionization



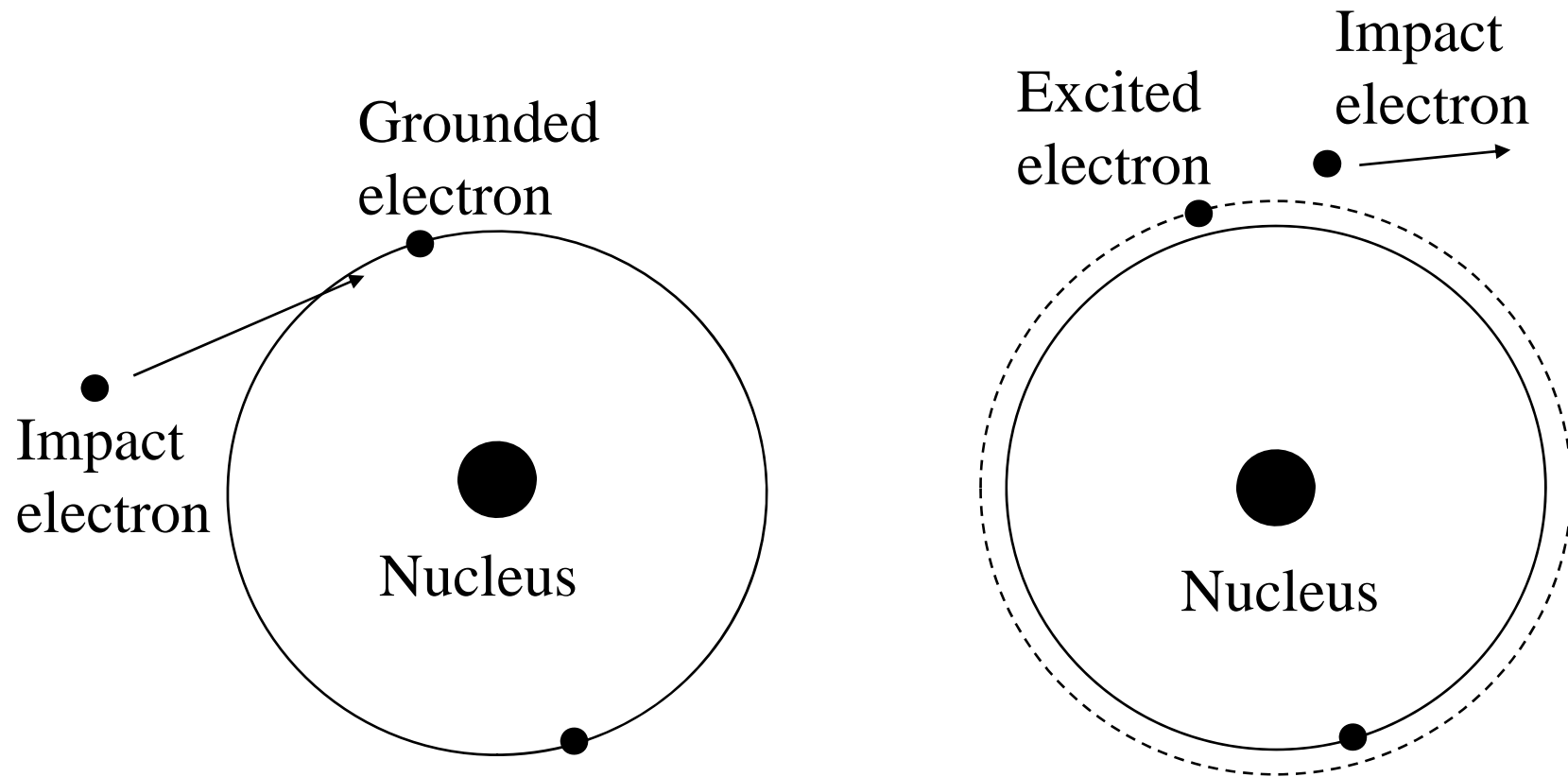
Excitation-Relaxation

激發-鬆弛



- 不同的原子或分子有不同的頻率, 因此不同的氣體有不同的發光顏色
- 發光顏色的變化被用來決定蝕刻和反應室清潔的終端點(endpoint).

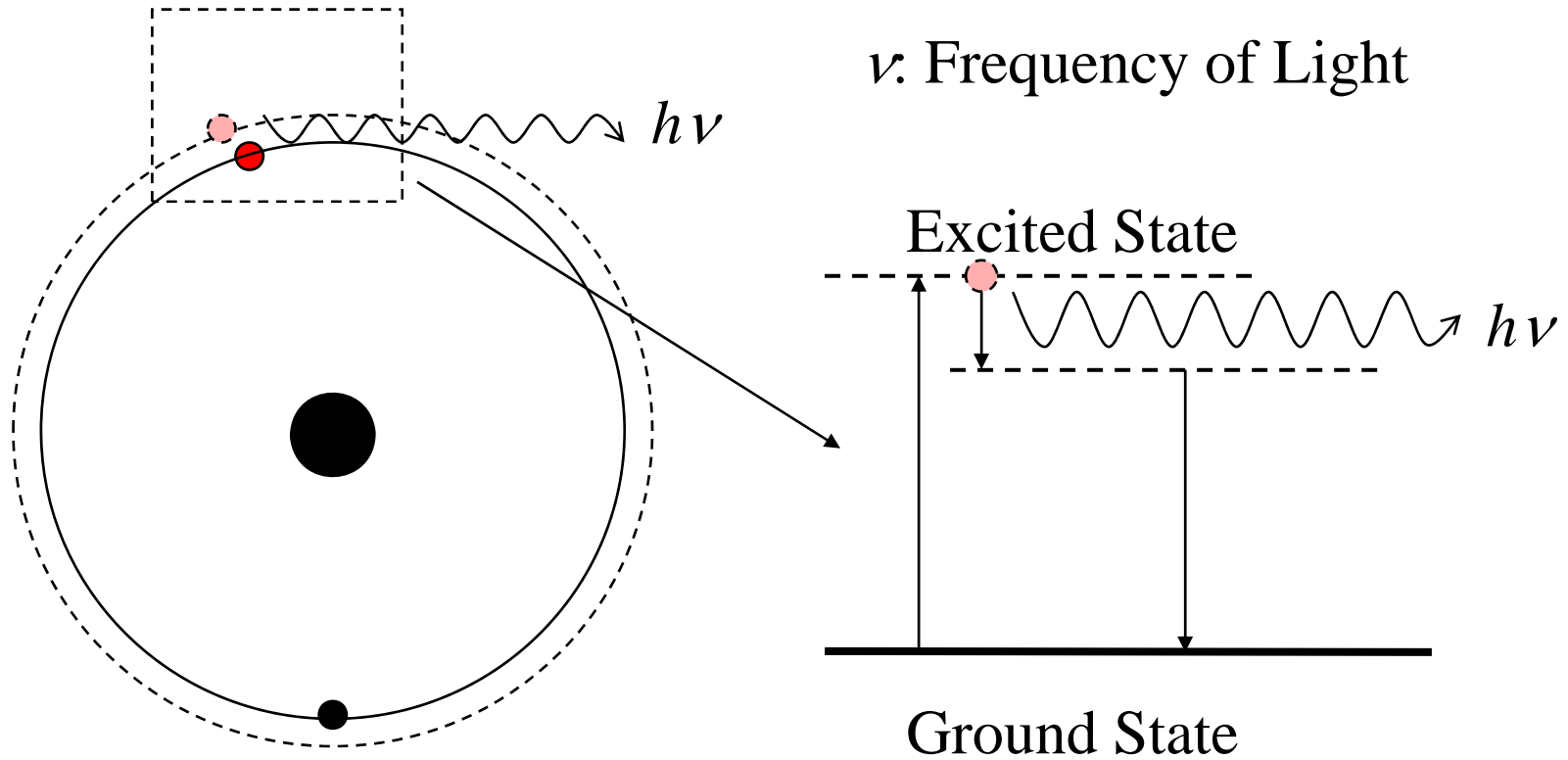
Excitation Collision



Relaxation

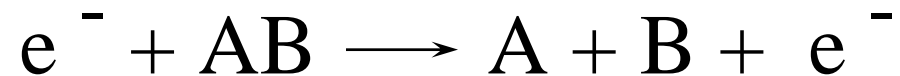
h : Planck Constant

ν : Frequency of Light



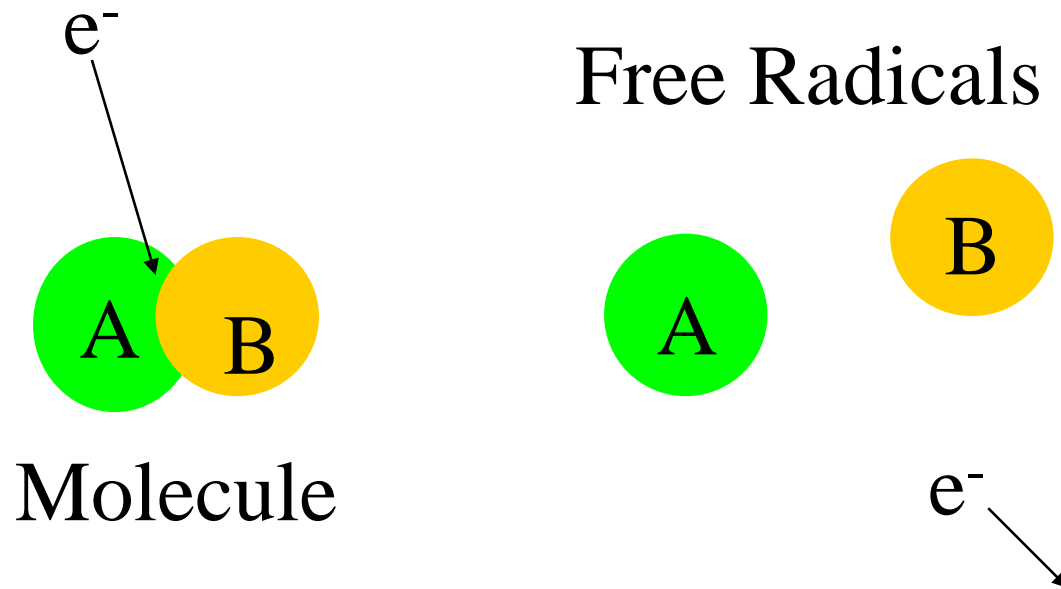
Dissociation

- 電子碰撞後分子能量較高時,能打破化學鍵產生自由基(free radicals)：



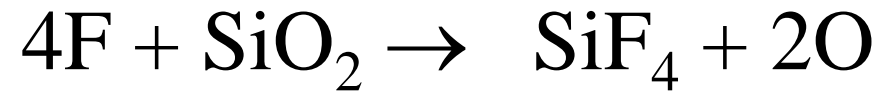
- 自由基至少有一個不成對的電子在化學上非常活潑
- 增加化學反應速率
- 對於蝕刻和CVD是非常重要的。

Dissociation



Plasma Etch

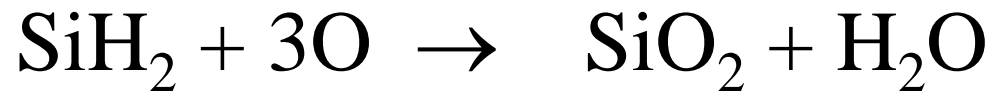
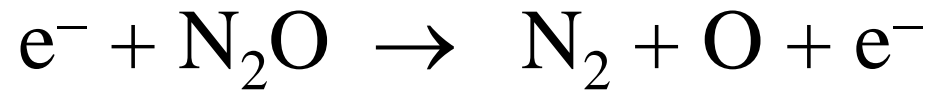
- 氧化物蝕刻中(CF₄)被使用在電漿中產生氟自由基(F)



- 增強蝕刻化學性質

Plasma Enhanced CVD

- PECVD 中使用矽烷(SiH₄)和氧的源材料 NO₂ (笑氣 laughing gas)



- 電漿蝕刻化學反應
- PECVD 在低溫下可達到高沉澱率

Table 7.1 Silane Dissociation

Collisions	Byproducts	Energy of Formation
$e^- + \text{SiH}_4$	$\text{SiH}_2 + \text{H}_2 + e^-$	2.2 eV
	$\text{SiH}_3 + \text{H} + e^-$	4.0 eV
	$\text{Si} + 2 \text{H}_2 + e^-$	4.2 eV
	$\text{SiH} + \text{H}_2 + \text{H} + e^-$	5.7 eV
	$\text{SiH}_2^* + 2\text{H} + e^-$	8.9 eV
	$\text{Si}^* + 2\text{H}_2 + e^-$	9.5 eV
	$\text{SiH}_2^+ + \text{H}_2 + 2 e^-$	11.9 eV
	$\text{SiH}_3^+ + \text{H} + 2 e^-$	12.32 eV
	$\text{Si}^+ + 2\text{H}_2 + 2 e^-$	13.6 eV
	$\text{SiH}^+ + \text{H}_2 + \text{H} + 2 e^-$	15.3 eV

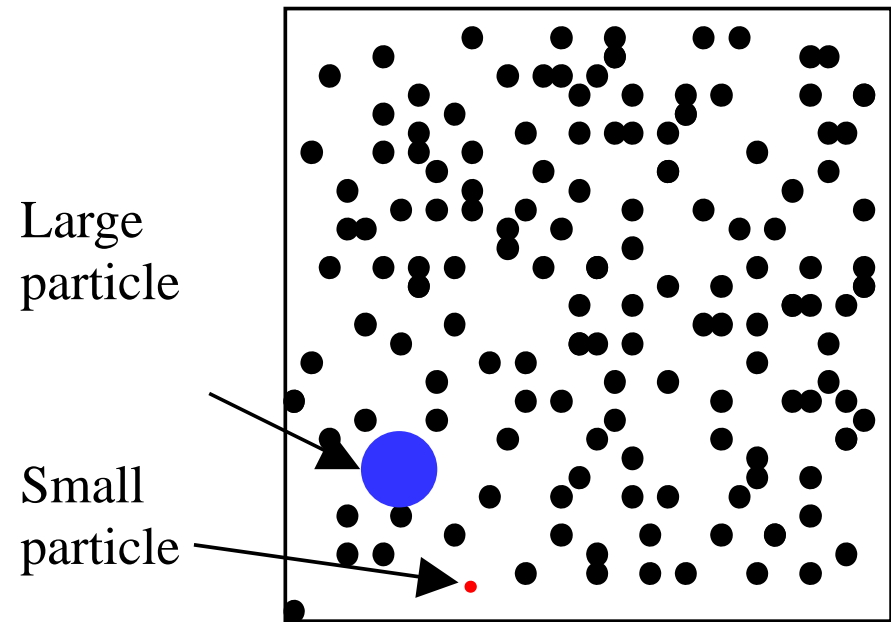
Mean Free Path (MFP)

- 粒子和粒子碰撞前能移動的平均距離

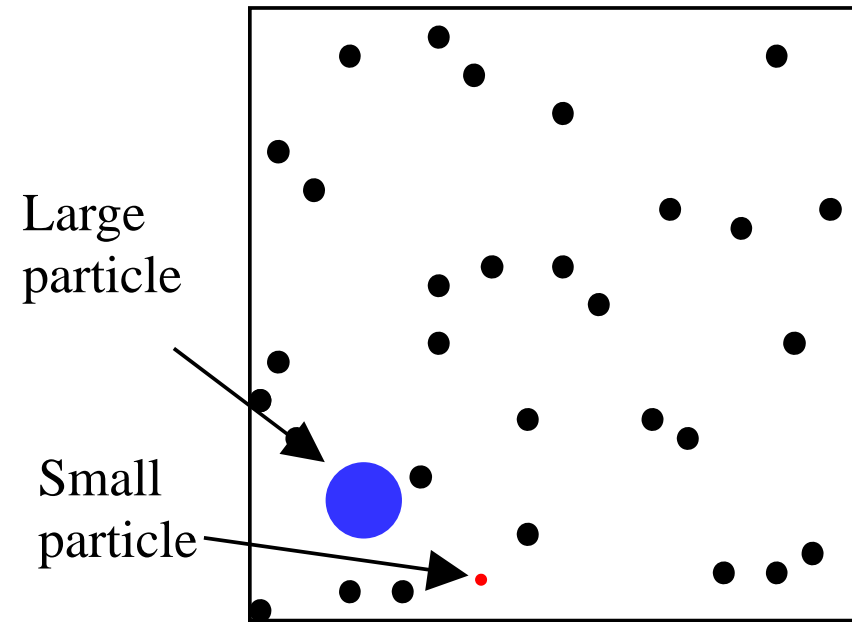
$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

- n 粒子密度
- σ 粒子的碰撞截面

MFP Illustration



(a)



(b)

Mean Free Path (MFP)

- 壓力影響:

$$\lambda \propto \frac{1}{p}$$

- 較高壓力, MFP較短
- 較低壓力, MFP較長

Movement of Charged Particle

- 電子遠比離子輕

$$m_e \ll m_i$$

$$m_e : m_{\text{Hydrogen}} = 1 : 1836$$

- 電力作用於電子與離子是相同的

$$F = qE$$

- 電子有很高的加速度

$$a = F/m$$

Movement of Charged Particle

- 射頻電場變換方向快速,電子加速的非常快而離子反應卻很慢
- 離子因有較大的截面所以有很多的碰撞因此也不易停止
- 在電漿中電子比離子移動快速很多

Thermal Velocity

- 電子熱速率

$$v = (kT_e/m_e)^{1/2}$$

- 射頻電漿中, T_e 大約是 2 eV

$$v_e \approx 5.93 \times 10^7 \text{ cm/sec} = 1.33 \times 10^7 \text{ mph}$$

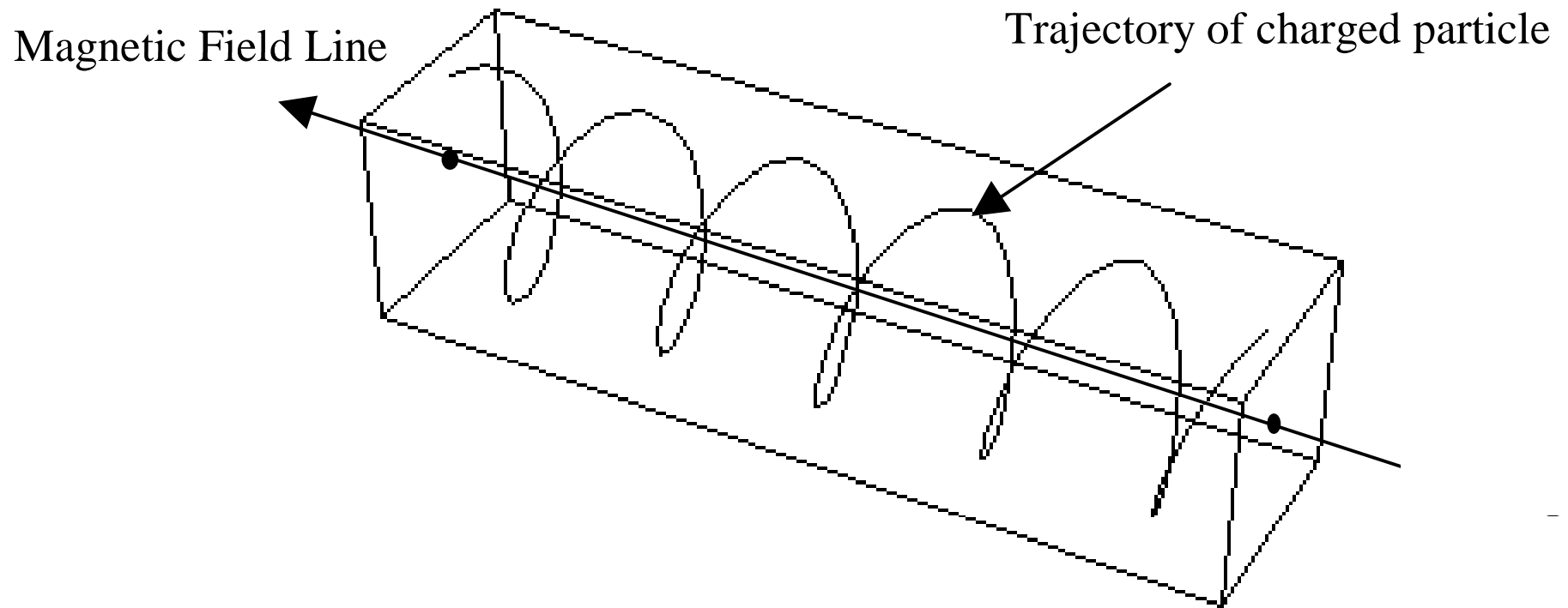
Magnetic Force and Gyro-motion

- 磁力作用於帶電粒子上：

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$$

- 磁力通常垂直於粒子速度
- 帶電粒子沿著磁場線成螺旋狀旋繞
- 螺旋運動(Gyro-motion).

Gyro-motion



Gyrofrequency

螺旋轉動頻率

- 帶電粒子在磁場中螺旋運動

$$\Omega = \frac{qB}{m}$$

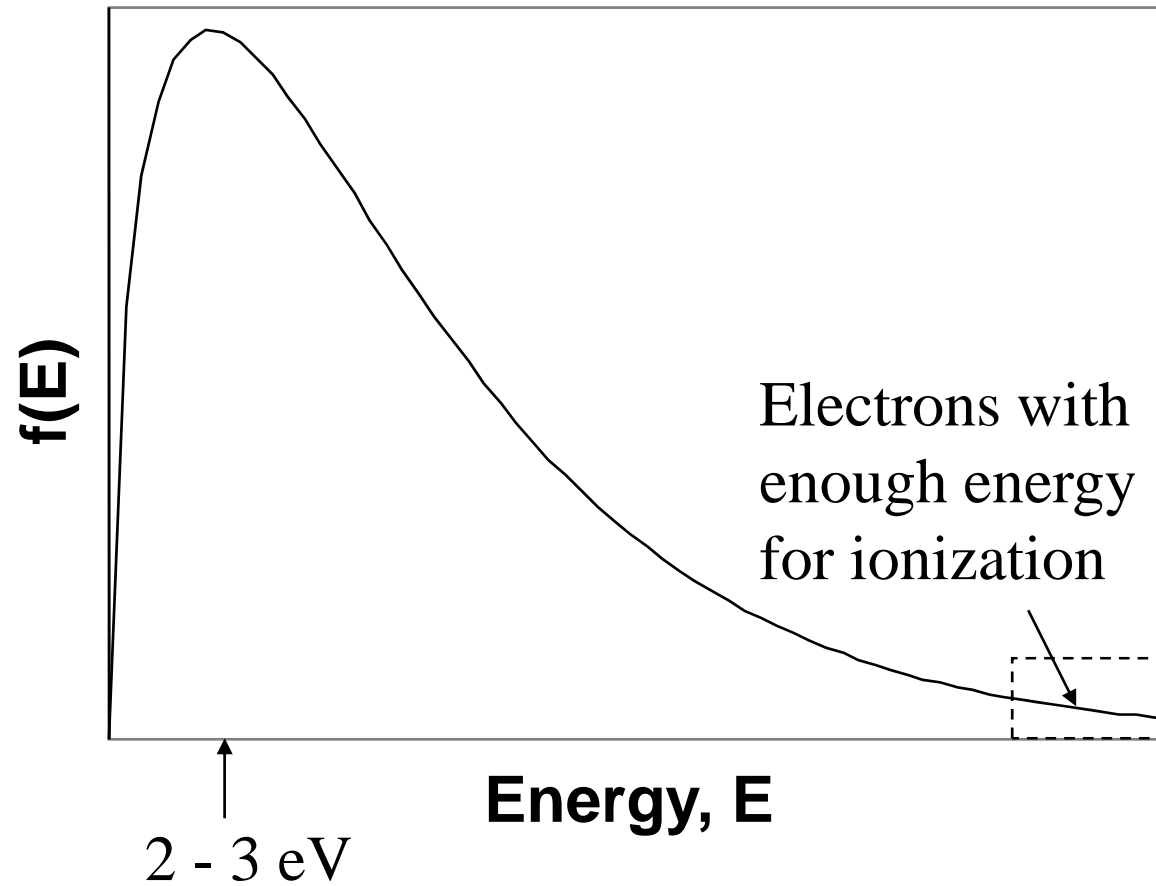
Gyroradius

螺旋轉動半徑

- 磁場中帶電粒子的螺旋轉動半徑 (Gyroradius), ρ , 可以表示為：

$$\rho = v_{\perp} / \Omega$$

Boltzmann Distribution



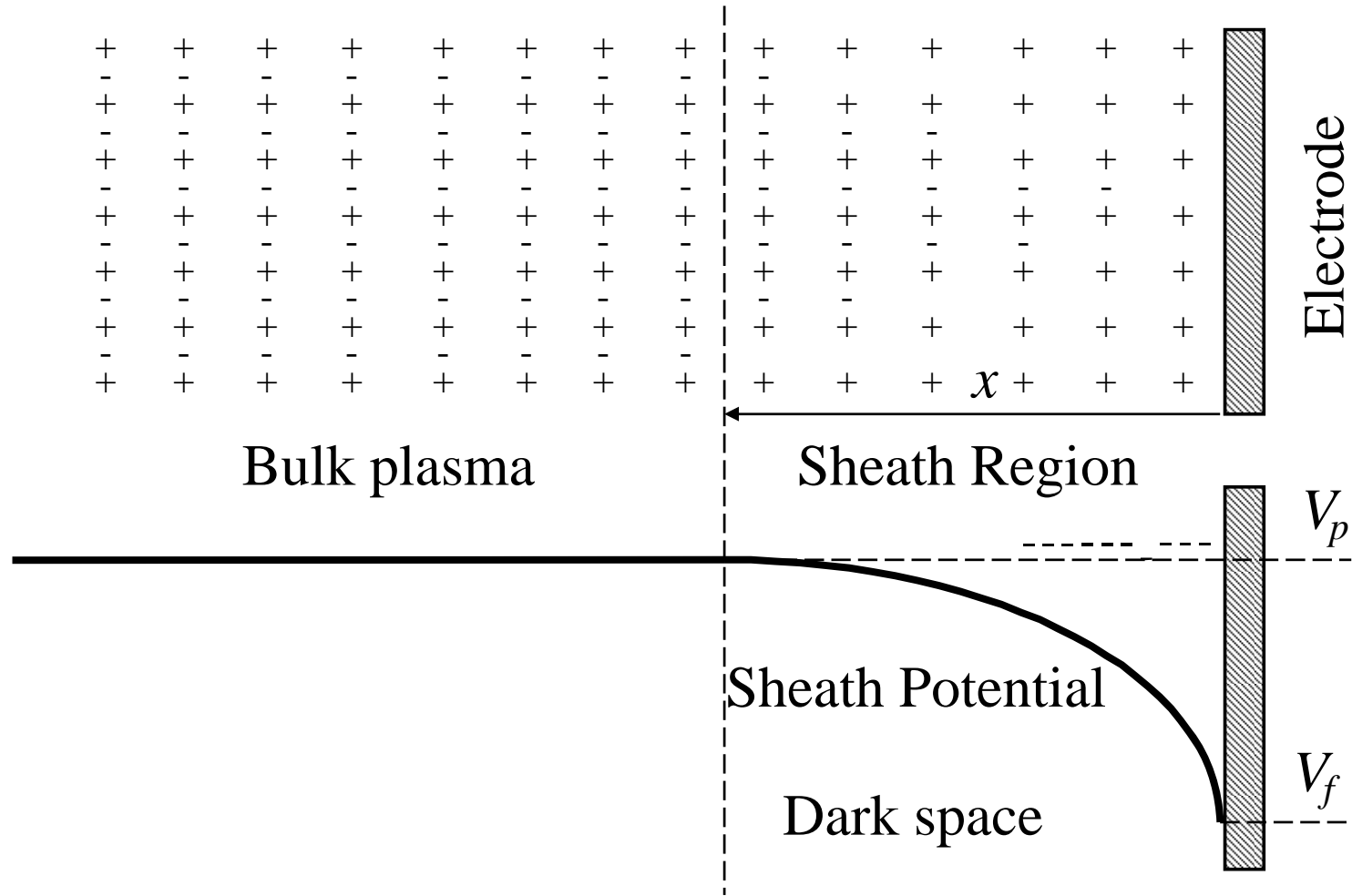
Ion Bombardment

- 任何接近電漿的東西都會被離子轟擊(ion bombardment)
- 對濺鍍(sputtering), 蝕刻及PECVD非常重要
- 主要取決於射頻功率
- 壓力也會影響轟擊

Ion Bombardment

- 電子到達電極和反應室牆壁
- 帶負電的電極,排斥電子而吸引離子
- 鞘層電位(sheath potential)加速離子朝向電極移動造成離子轟擊(ion bombardment)
- 離子轟擊對於蝕刻,濺鍍及PECVD製程非常重要

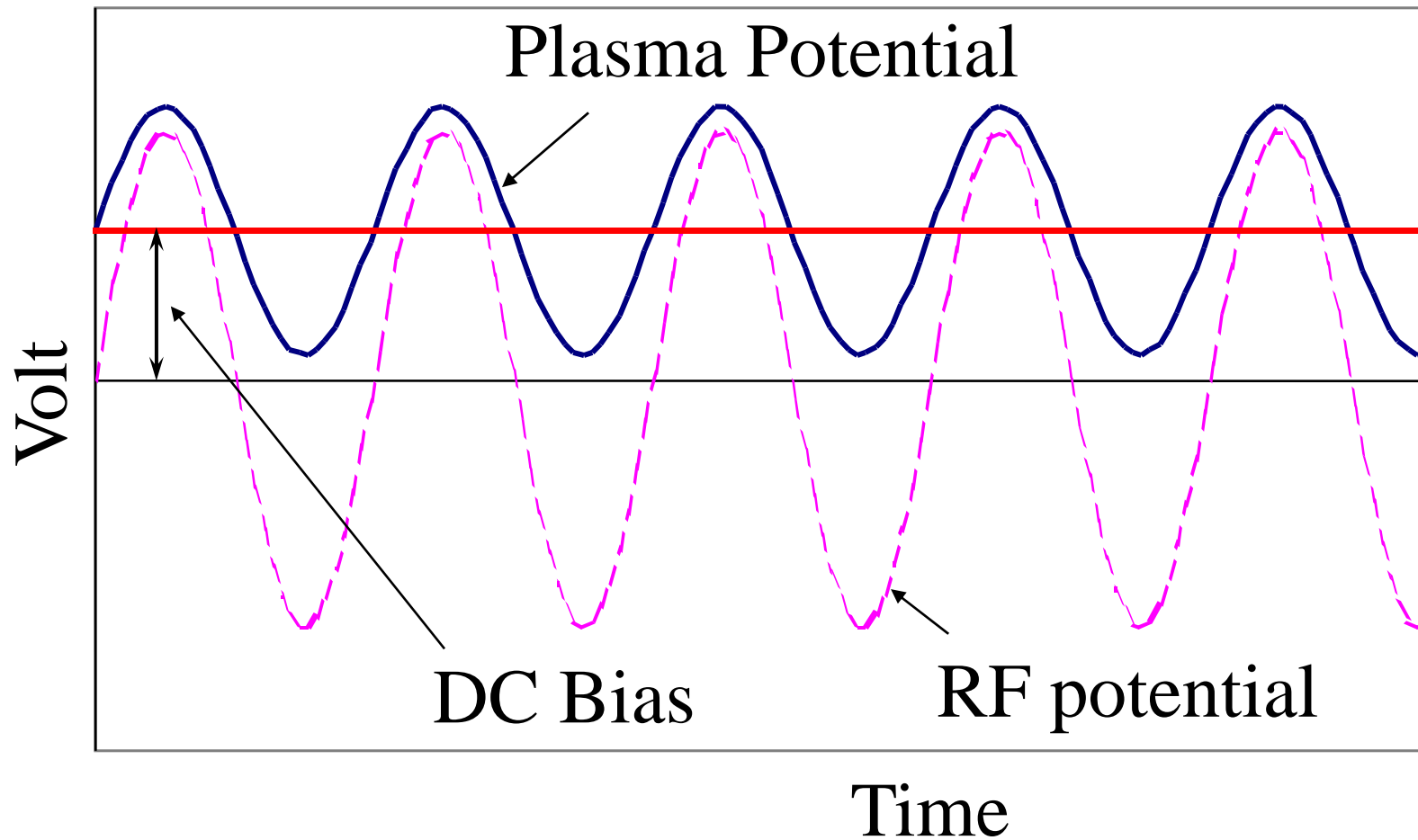
Sheath Potential



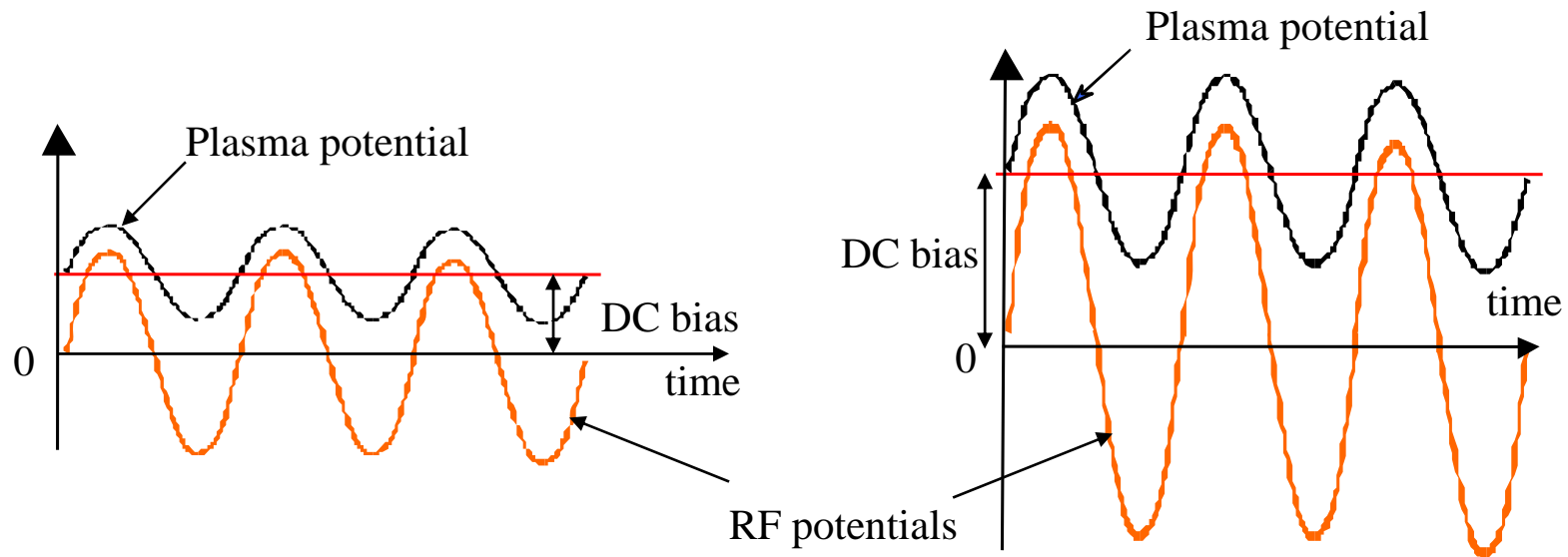
Applications of Ion bombardment

- 幫助達到非等向性(anisotropic)蝕刻輪廓
 - 損害機制
 - 保護膜機制
- 氬氣(argon)濺鍍
 - 電介質填滿間隙
 - 金屬沉積
- 在PECVD製程中幫助控制薄膜應力
 - 重度轟擊, 薄膜更具壓縮力

Plasma Potential & DC Bias



DC biases and RF powers



- Lower RF power
- Smaller DC bias

- Higher RF power
- Larger DC bias

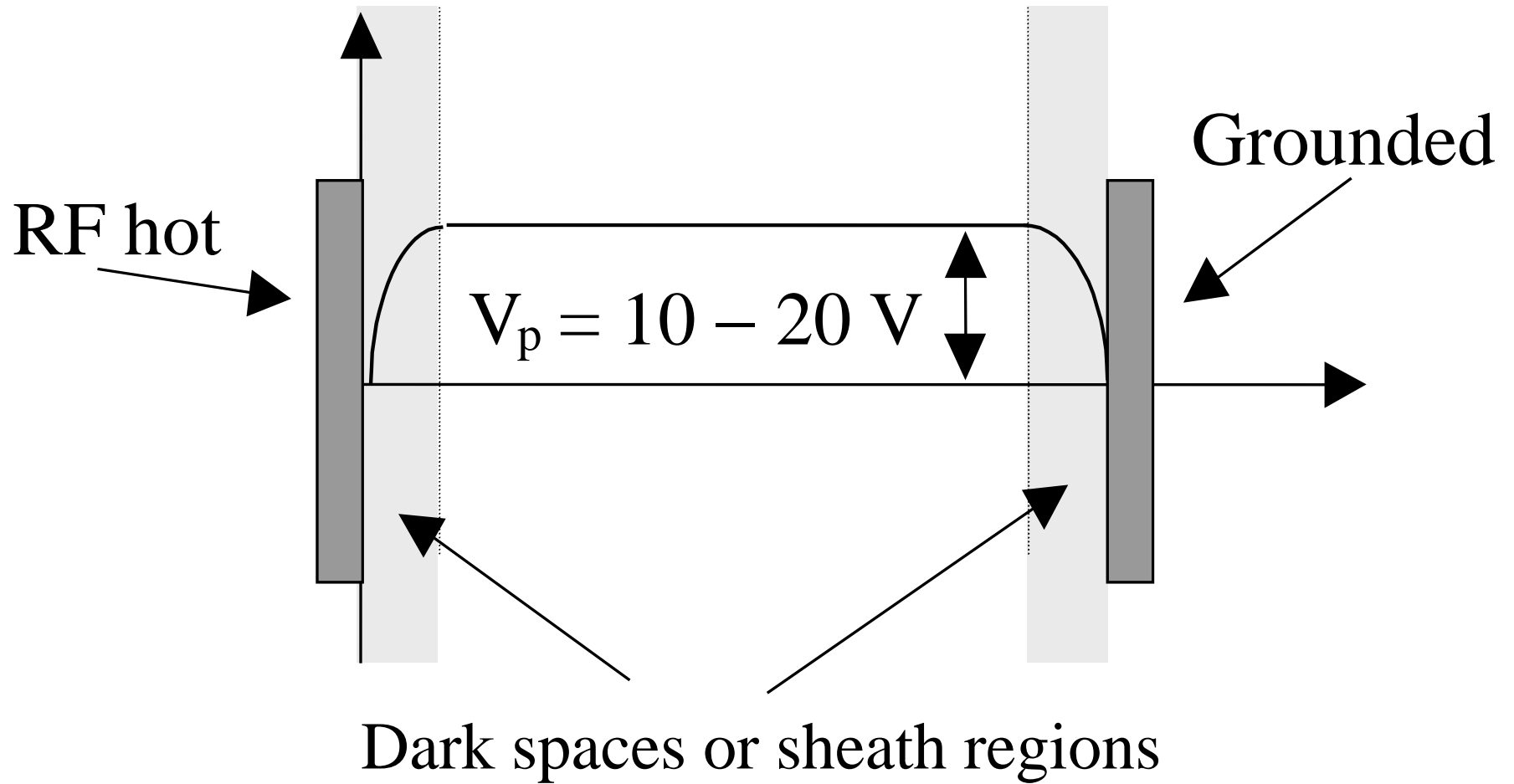
Ion Bombardment

- 離子能量
- 離子密度
- 皆受射頻功率控制

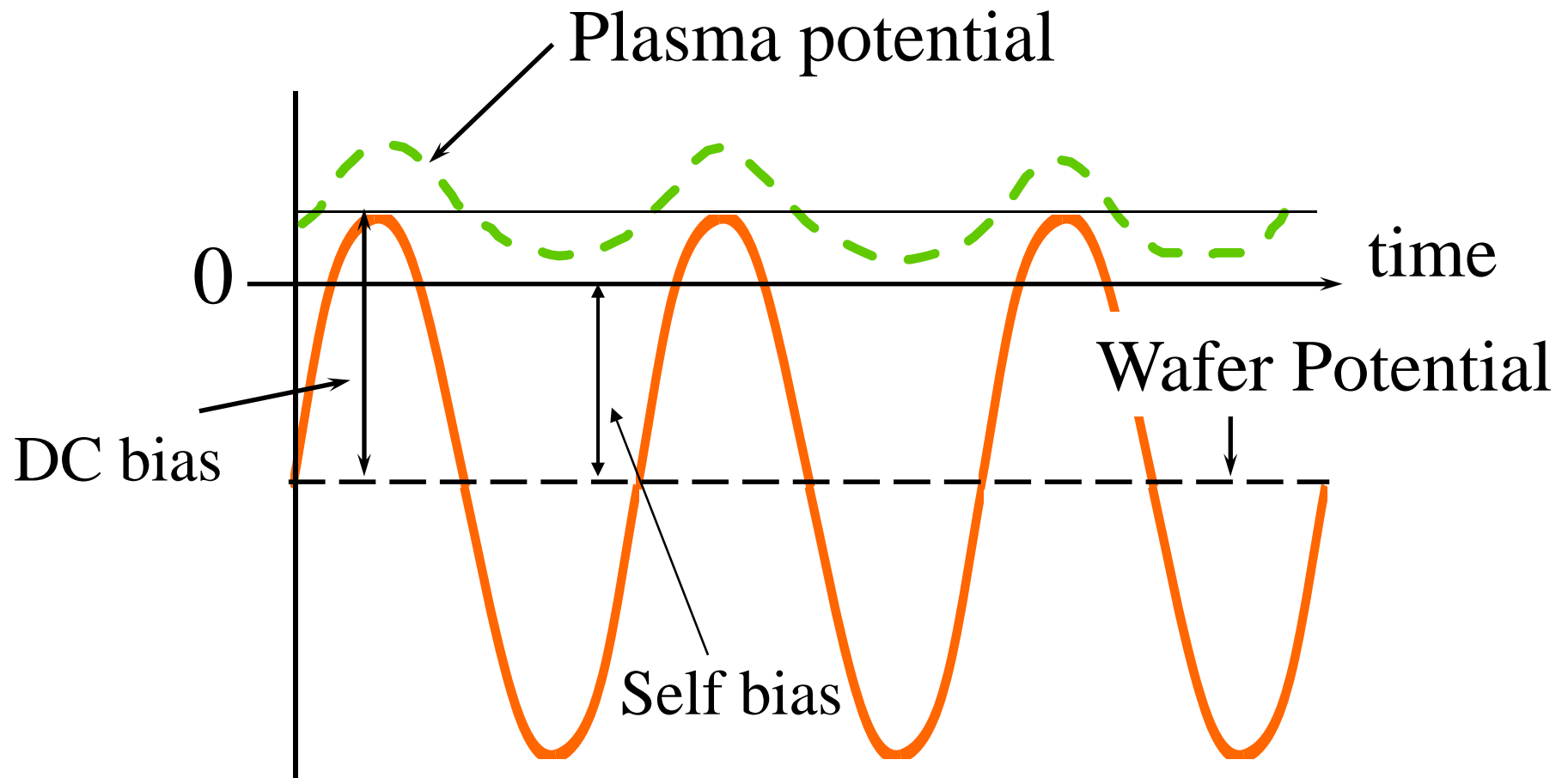
Ion Bombardment Control

- 增加射頻功率, 增加直流偏壓, 離子密度亦增加
- 射頻功率控制離子密度和離子轟擊能量
- 對於離子轟擊射頻功率是最重要的
- PECVD製程中射頻功率也控制薄膜應力

DC Bias of CVD Chamber Plasma



DC Bias of Etch Chamber Plasma



Ion Bombardment and Electrode Size

- 較小電極上的自我偏壓有較多的離子轟擊能量
- 蝕刻反應室通常將晶圓放在較小電極上

Advantages of Using Plasma

- 在IC製程中使用電漿：
 - PECVD
 - CVD 反應室乾式清洗
 - 電漿蝕刻
 - PVD
 - 離子佈植

Benefits of Using Plasma For CVD Process

- 較低溫度下可達高沉積速率
- 控制薄膜應力
- 反應室乾式清洗

Comparison of PECVD and LPCVD

Processes	LPCVD (150 mm)	PECVD (150 mm)
Chemical reaction	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \dots$	$\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + \dots$
Process parameters	p = 3 Torr, T = 400 °C	p = 3 Torr, T = 400 °C and RF = 180 W
Deposition rate	100 to 200 Å/min	≥ 8000 Å/min
Process systems	Batch system	Single-wafer system
Wafer to wafer uniformity	Difficult to control	Easier to control

Benefits of Using Plasma For Etch Process

- 高蝕刻速率
- 非等向性蝕刻輪廓
- 偵測終端點(endpoint)
- 使用和處理少量的化學藥品

Benefits of Using Plasma For PVD Process

- 氬氣濺鍍
- 高薄膜品質
 - 較少雜質及高導電率
- 較佳一致性
- 較佳製程控制
- 高製程整合能力
- 容易沉積金屬合金薄膜

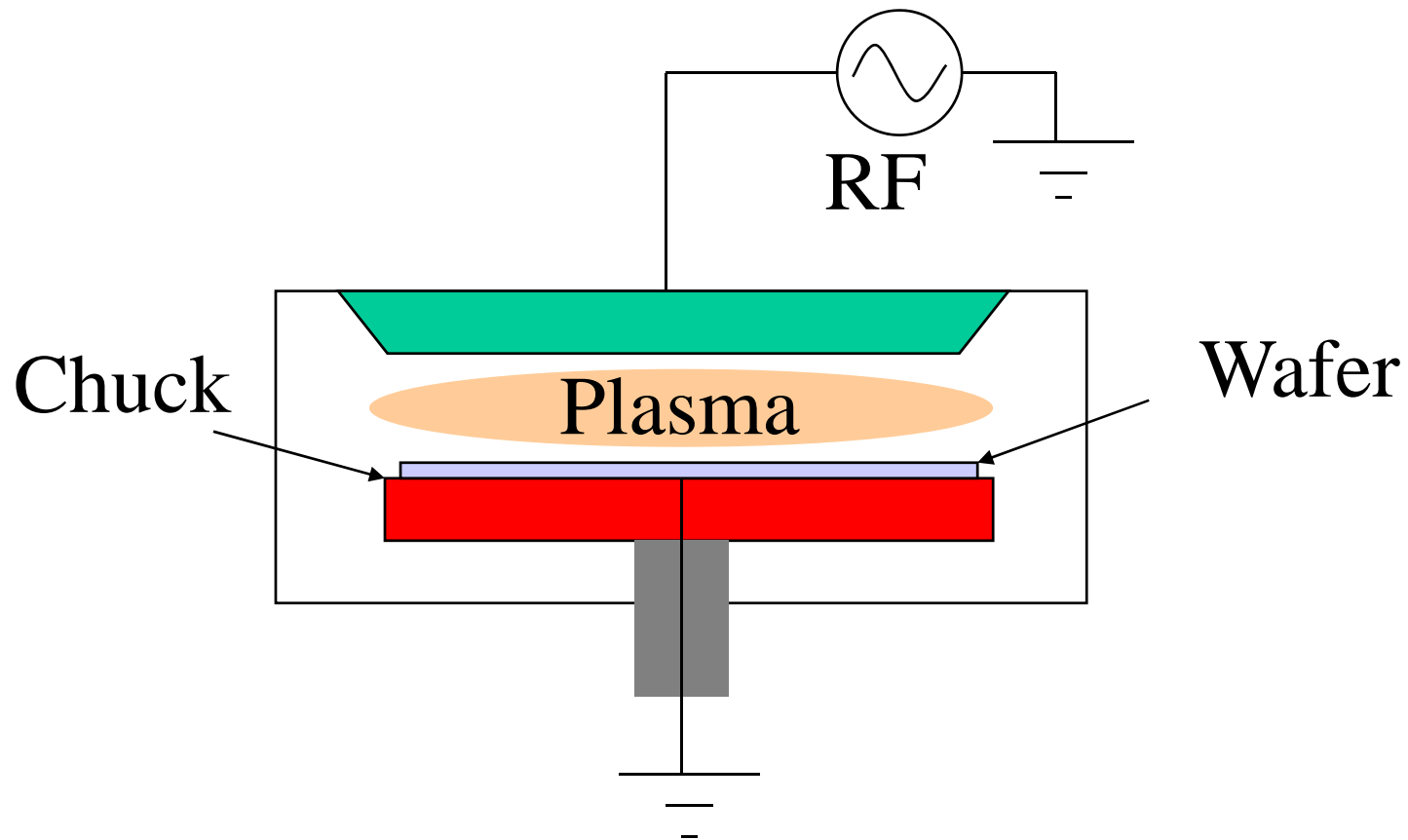
PECVD and Plasma Etch Chambers

- CVD：在晶圓表面增加材料
 - 自由基
 - 利用轟擊控制應力
- Etch：從晶圓表面將原料移除
 - 自由基
 - 劇烈轟擊
 - 於低壓,離子定向性較佳

PECVD Chambers

- 離子轟擊控制薄膜應力
- 晶圓置於電極上
- 射頻熱電極和接地電極有相同面積
- 有非常小的自我偏壓
- 離子轟擊能量大約10 to 20 eV, 主要取決於射頻功率

Schematic of a PECVD Chamber



Plasma Etch Chambers

- 離子轟擊
 - 完全移除
 - 打斷化學鍵
- 晶圓在小的電極上
- 自我偏壓
- 離子轟擊能量
 - 晶圓上(射頻熱電極): 200 to 1000 eV
 - 蓋子上(接地電極): 10 to 20 eV.

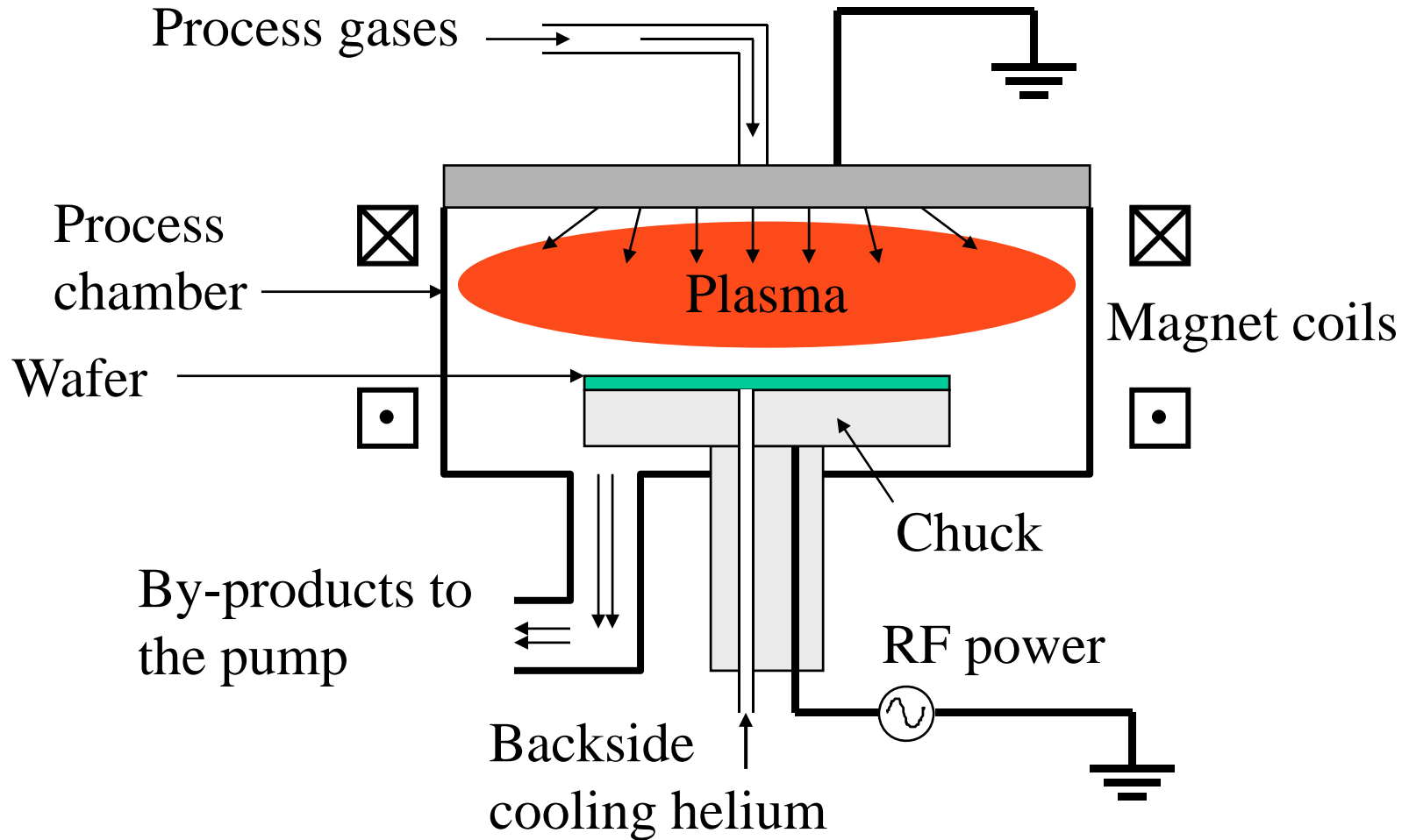
Plasma Etch Chambers

- 劇烈離子轟擊產生熱量
- 控制溫度保護光阻光罩
- 水冷式晶圓夾盤 (pedestal, cathode)
- 低壓不利於從晶圓夾盤上轉移熱能
- 氦氣背面冷卻
- 夾環或靜電夾盤(E-chuck)固定晶圓

Plasma Etch Chambers

- 蝕刻需低壓
 - 較長MFP, 離子能量較多不易分散
- 低壓, 長MFP, 低離子化碰撞
 - 難以產生電漿
- 磁力使電子旋轉及運動距離加常以增加碰撞

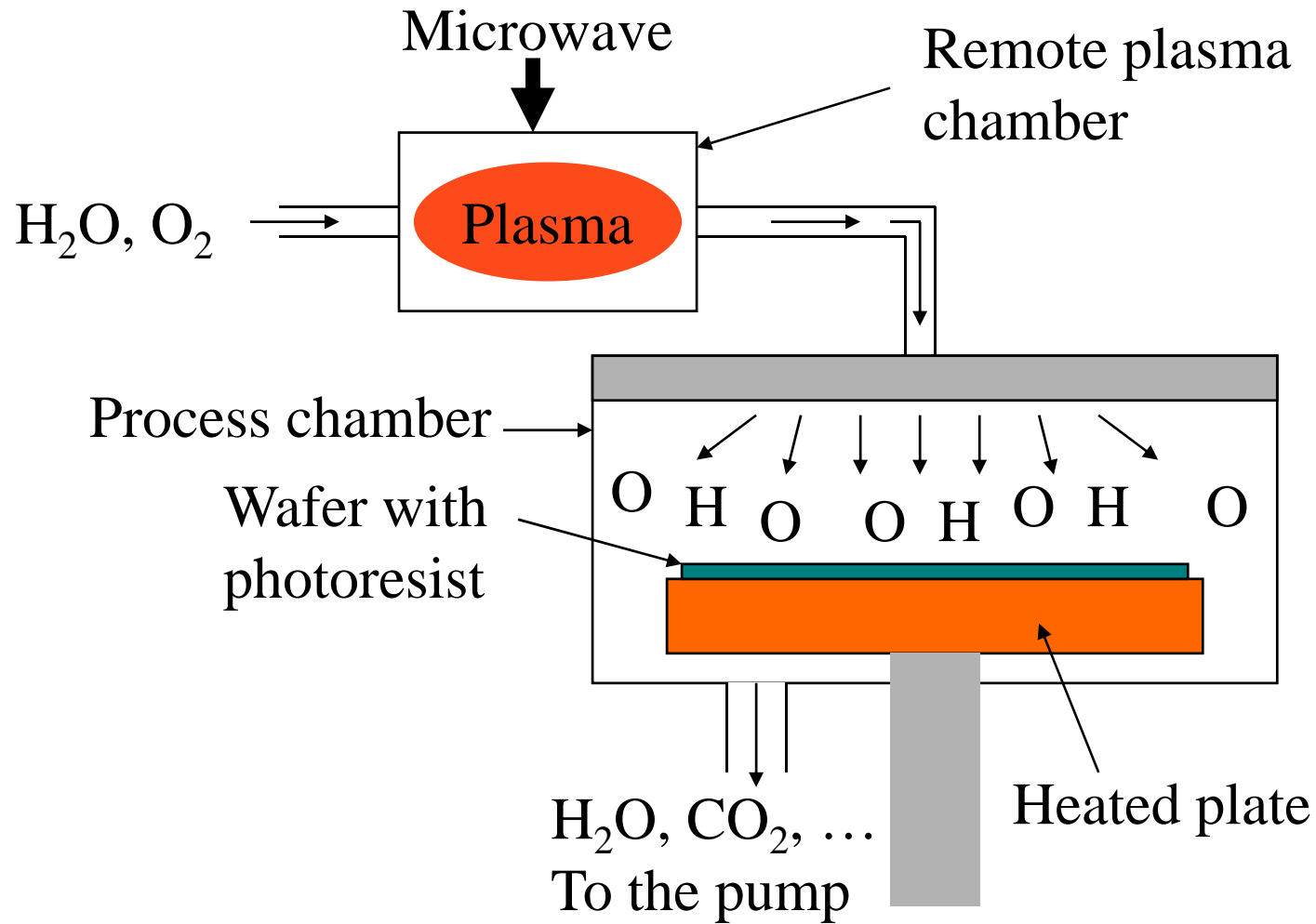
Schematic of an Etch Chamber



Photoresist Strip

- 蝕刻後立即移除光阻
- 利用O₂ 及H₂O
- 可以與蝕刻系統整合
- 臨場蝕刻和光阻剝除
- 改善產量和良率

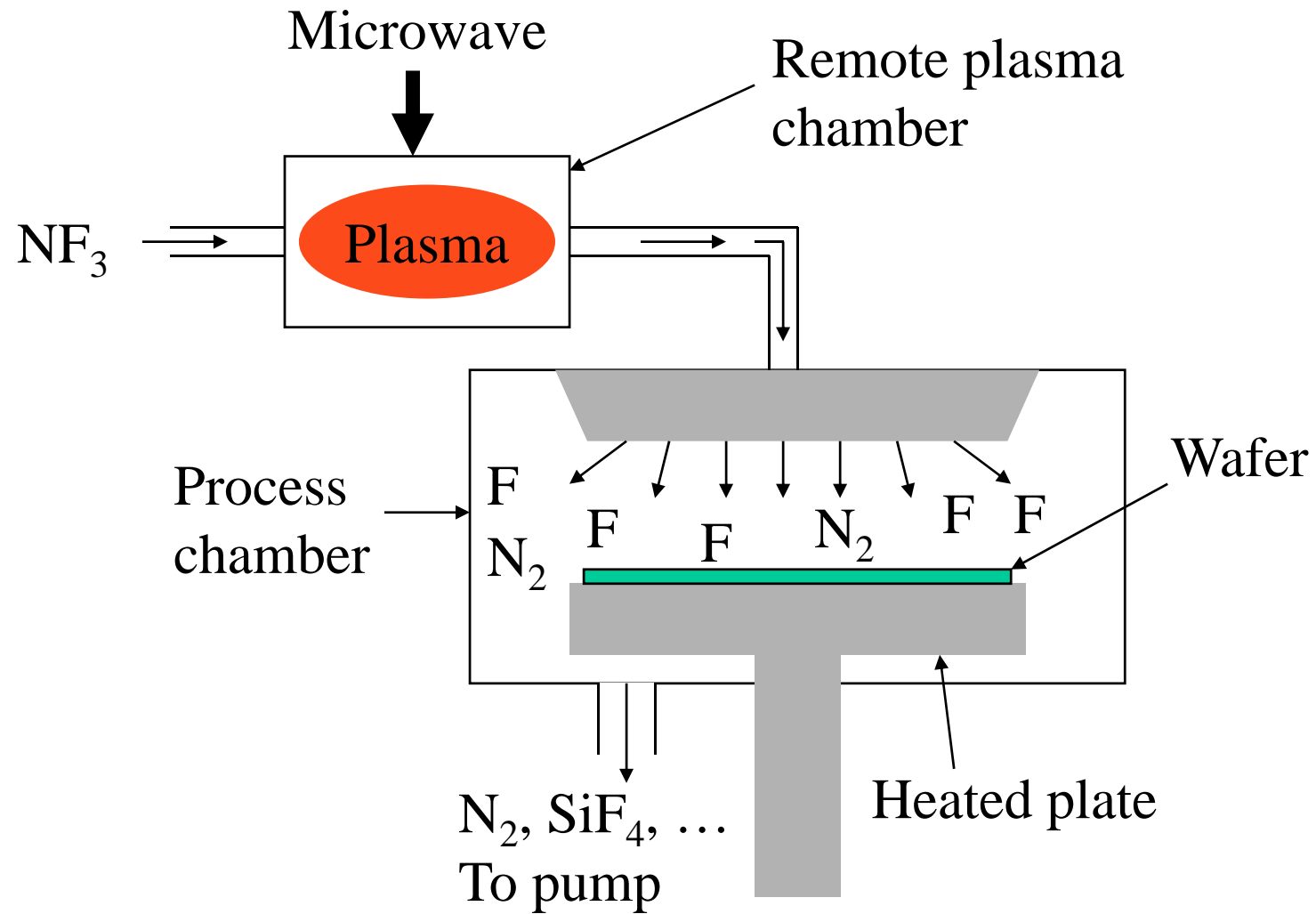
Photoresist Strip Process



Remote Plasma Etch

- 應用：等向蝕刻製程
 - 矽的局部氧化(LOCOS)或淺溝槽絕緣(STI)中氮化物剝除
 - 酒杯狀接觸窗孔蝕刻
- 可以與電漿蝕刻系統整合
 - 改善產量
- 盡力取代濕式製程

Remote Plasma Etch System



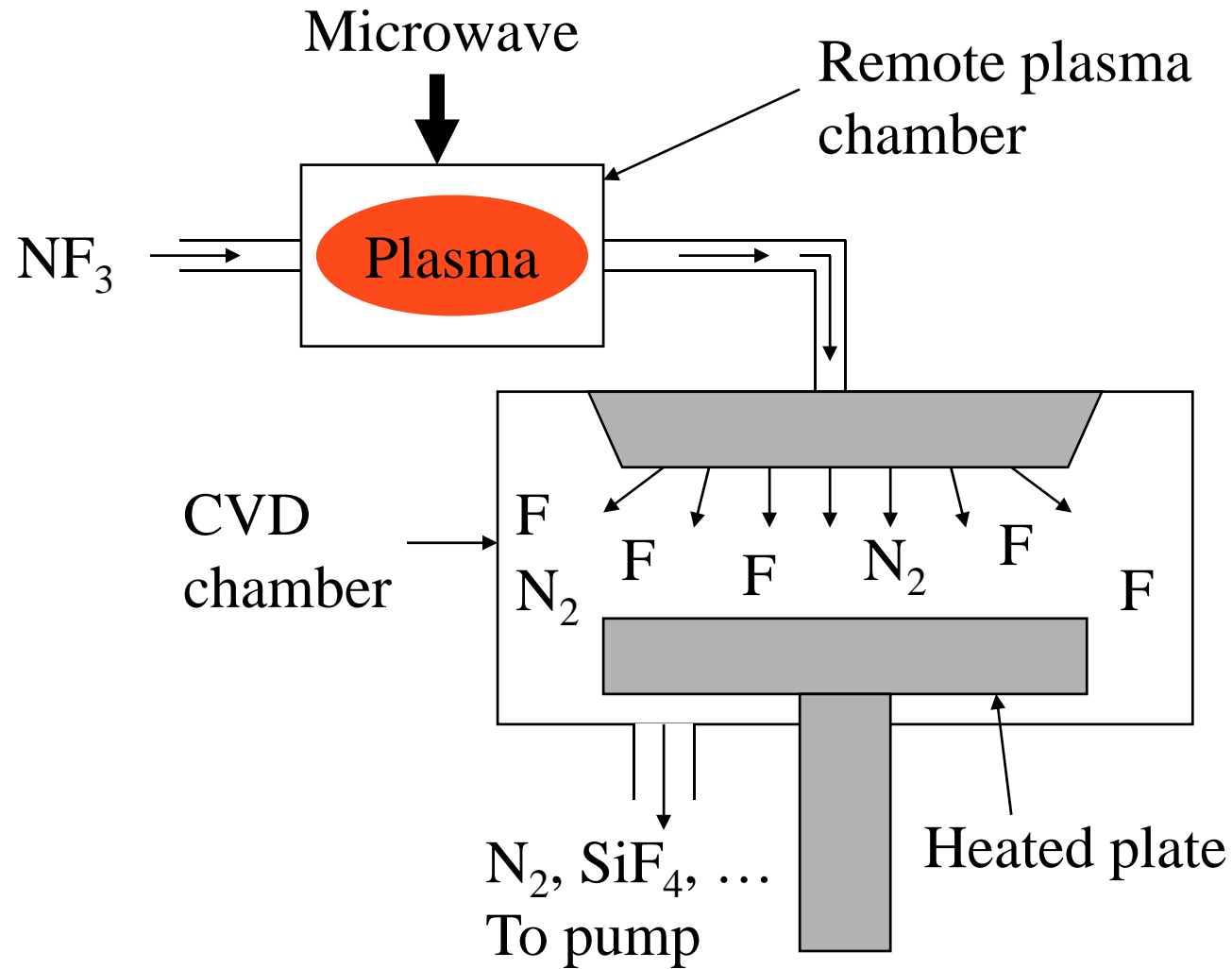
Remote Plasma Clean

- 沉積不只在晶圓表面
- CVD反應室需清洗
 - 避免薄膜破裂產生微粒污染
- 電漿清潔通常使用碳氟化合物氣體
 - 離子轟擊影響壽命
 - 碳氟化合物低的分解率
 - 關於碳氟化合物釋出的環保

Remote Plasma Clean

- 微波高密度電漿
- 自由基流動於CVD反應室內
- 與沉積薄膜反應並消除
- 清潔反應室
 - 溫和的製程, 延長壽命
 - 高分解率, 產生少量的碳氟化合物

Remote Plasma Clean System



Remote Plasma CVD (RPCVD)

- 磊晶矽鍺於高速BiCMOS
- 仍在研究與發展
- 閘極介電質: SiO_2 , SiON , and Si_3N_4
- 高介電常數(High- κ): HfO_2 , TiO_2 , and Ta_2O_5
- PMD 氮化物阻擋層
 - LPCVD: 積存限制(budget limitations)
 - PECVD: 電漿引發損傷

High-density Plasma

- 高密度於低壓中是被祈求的
- 低壓中MFP較長,減少離子散射,增加蝕刻輪廓控制
- 密度越高,離子和自由基越多
 - 增加化學反應
 - 增加離子轟擊
- 對於CVD製程,高密度電漿能在臨場,同步沉積/回蝕/沉積增加間隙填充能力

ICP and ECR

- 在IC工業普遍使用
- 感應耦合型電漿(Inductively coupled plasma, ICP)
 - 也稱變壓器耦合電漿源(transformer coupled plasma, TCP)
- 電子迴旋共振(Electron cyclotron resonance, ECR)
- 低壓狀態下
- 獨立控制離子流通量即離子能量

Inductively Coupled Plasma (ICP)

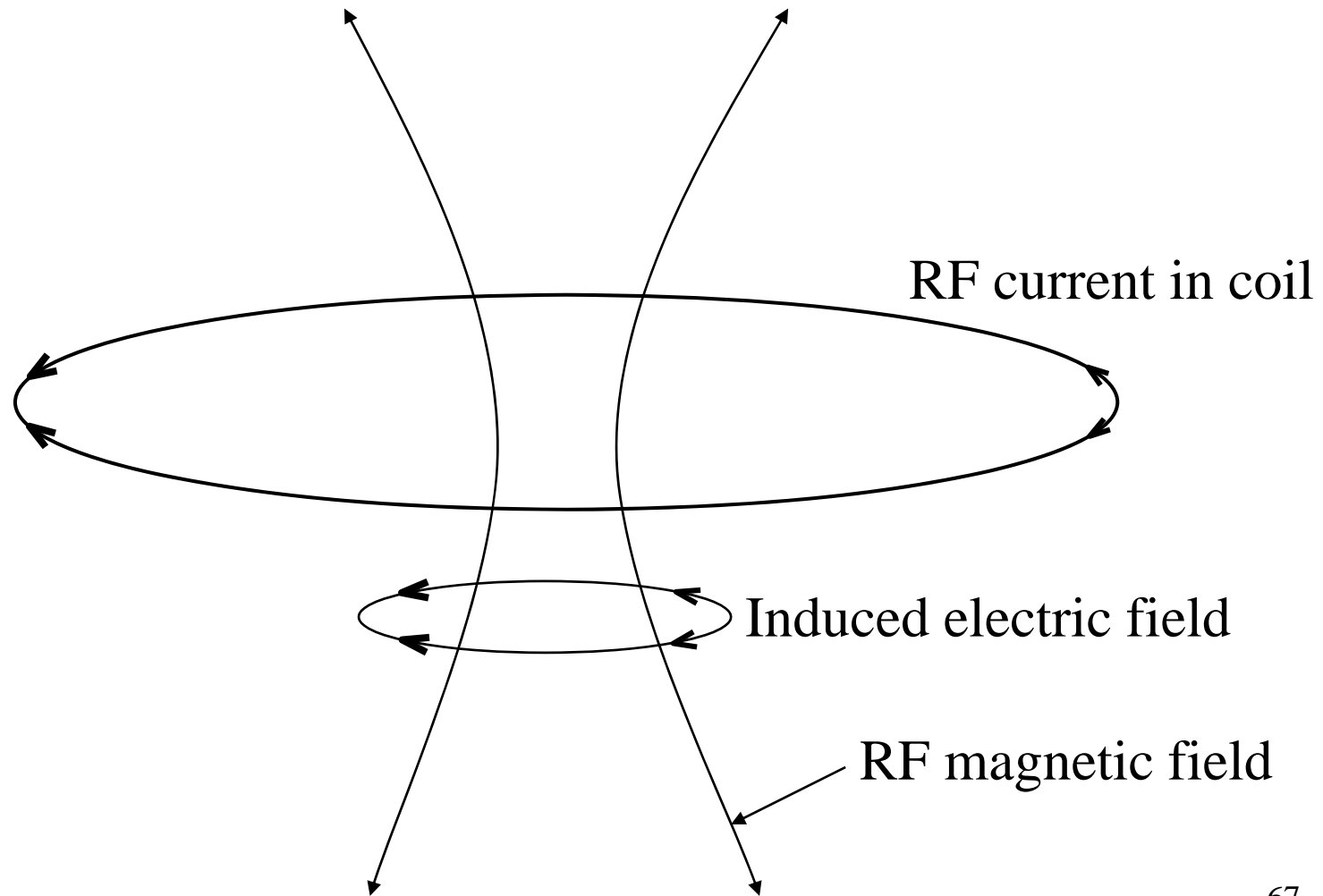
- 射頻電流通過線圈產生一個經由感應耦合隨時間變化的電場
- 迴旋型電場加速電子往迴旋方向
- 電子移動長距離而不撞到反應室牆壁與電極
- 離子化碰撞在低壓產生高密度電漿

Inductively Coupled Plasma (ICP)

感應耦合電漿離子蝕刻系統

- 感應耦合電漿離子蝕刻系統包含非等向性蝕刻、保護製程及等向性蝕刻，Dry SCREAM 製程技術利用上述特性，只需一道黃光製程及接續的 ICP 製程即能製作出懸浮結構，相較於其他方法可大幅節省製程時程。另結合奈米級遮罩，如電子束微影技術製作奈米等級的遮罩圖案，再經 ICP 蝕刻矽晶片，可製作出奈米級高深寬比的矽結構。

Illustration of Inductive Coupling





ICP 為具有高電漿密度低氣體壓力 (high density low pressure, HDLP) 之蝕刻技術，可廣泛應用於微製造技術的研發
製程應用：

標準之非等向性蝕刻

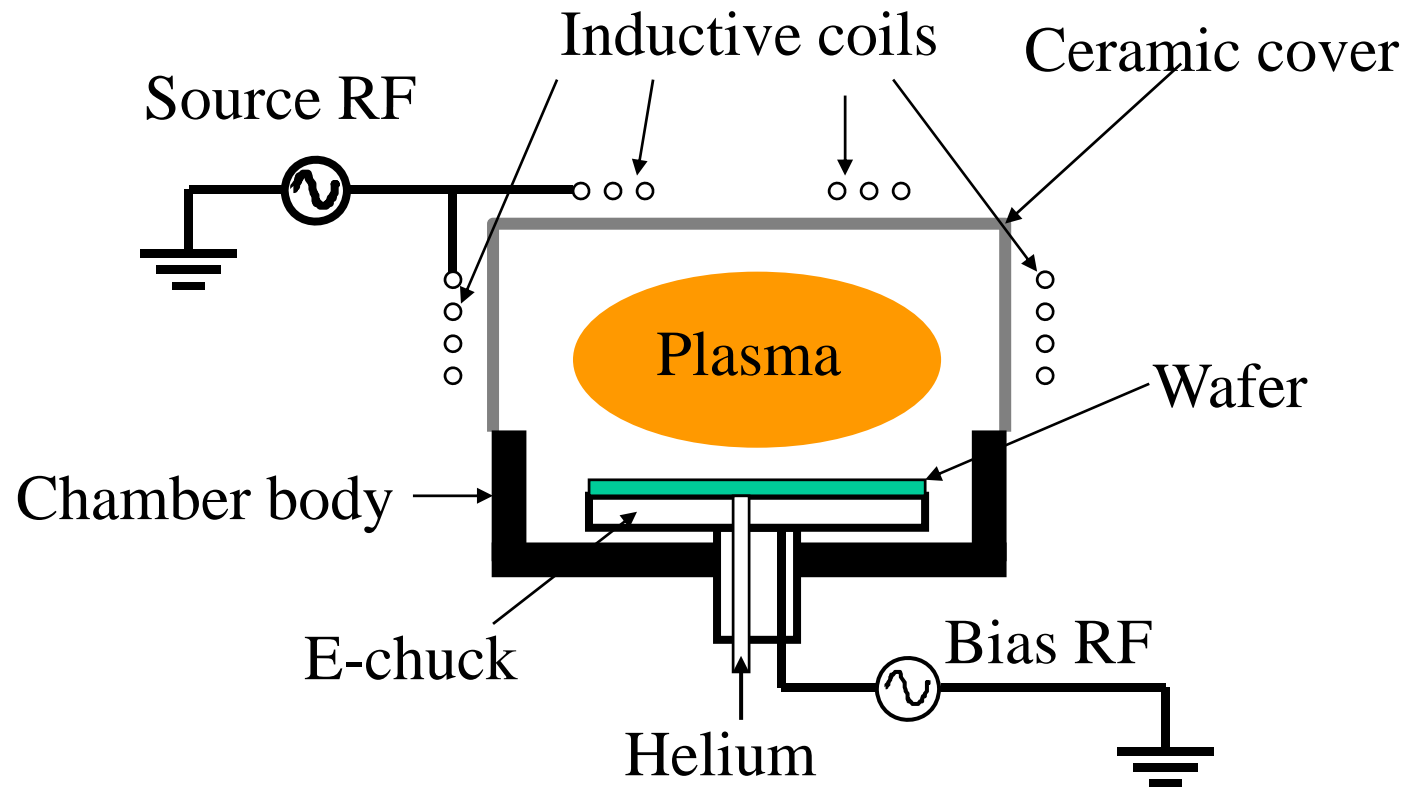
製程規格：依設計、晶片及線寬會有不同

深寬比： $>20\sim30$

垂直度： $89\pm 1^\circ$

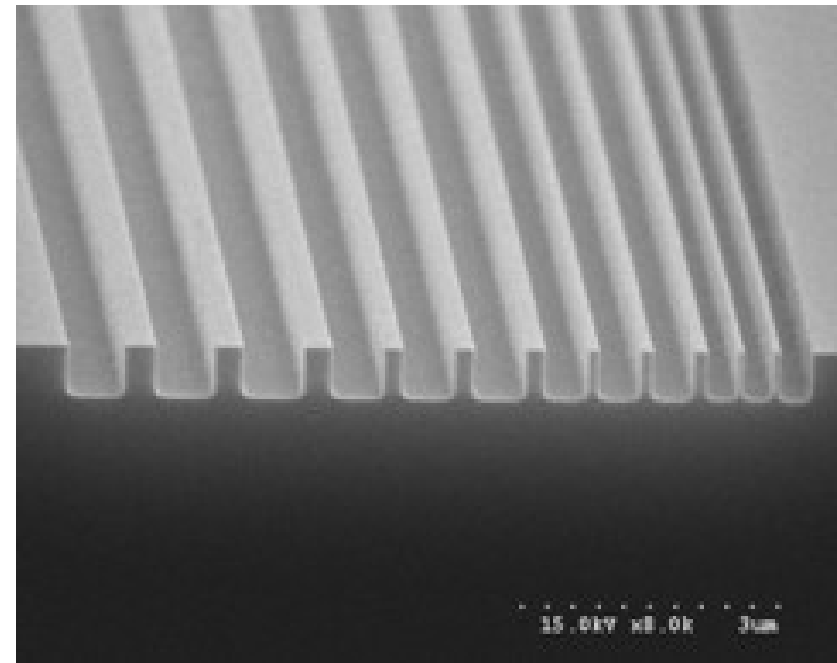
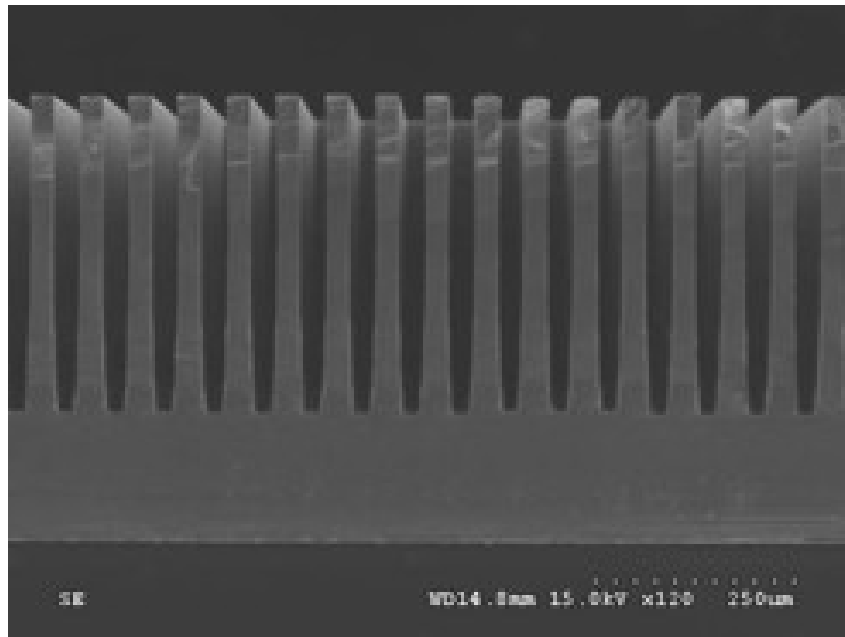
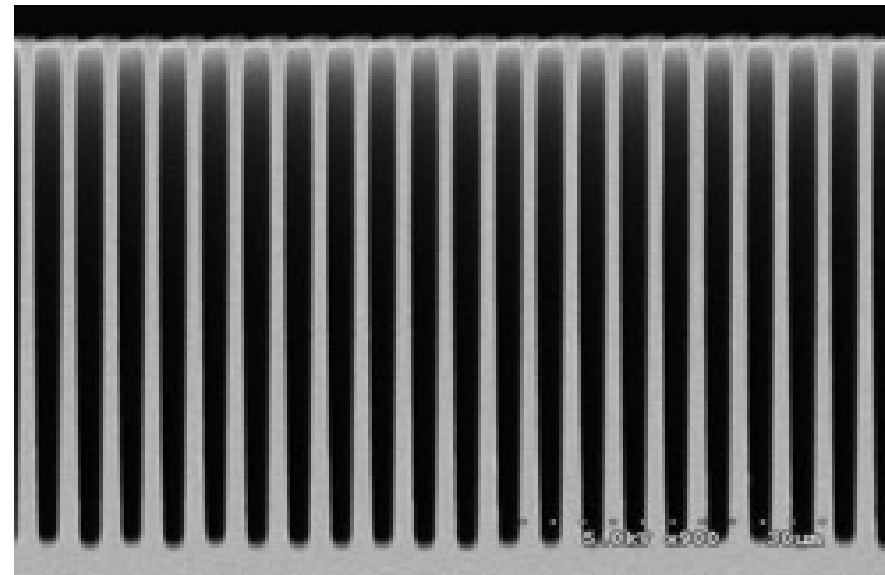
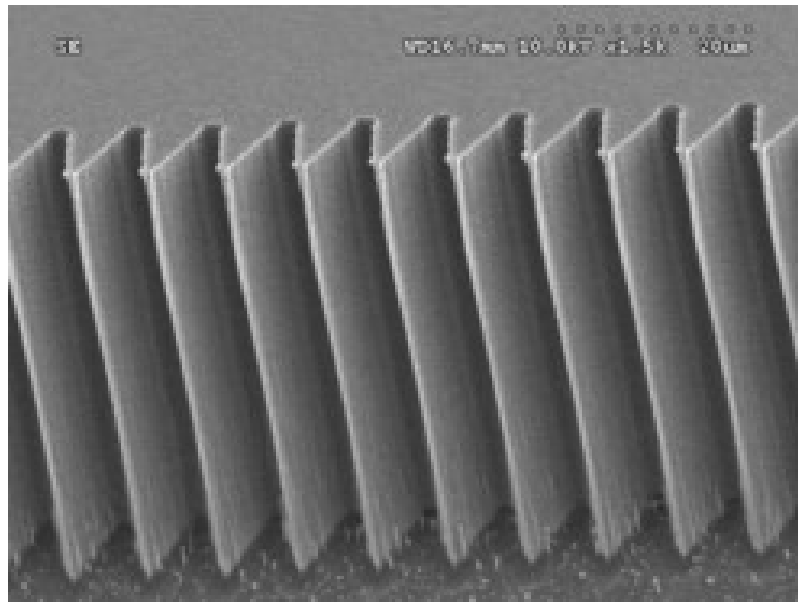
側壁粗糙度： $RMS > 30\text{nm}$

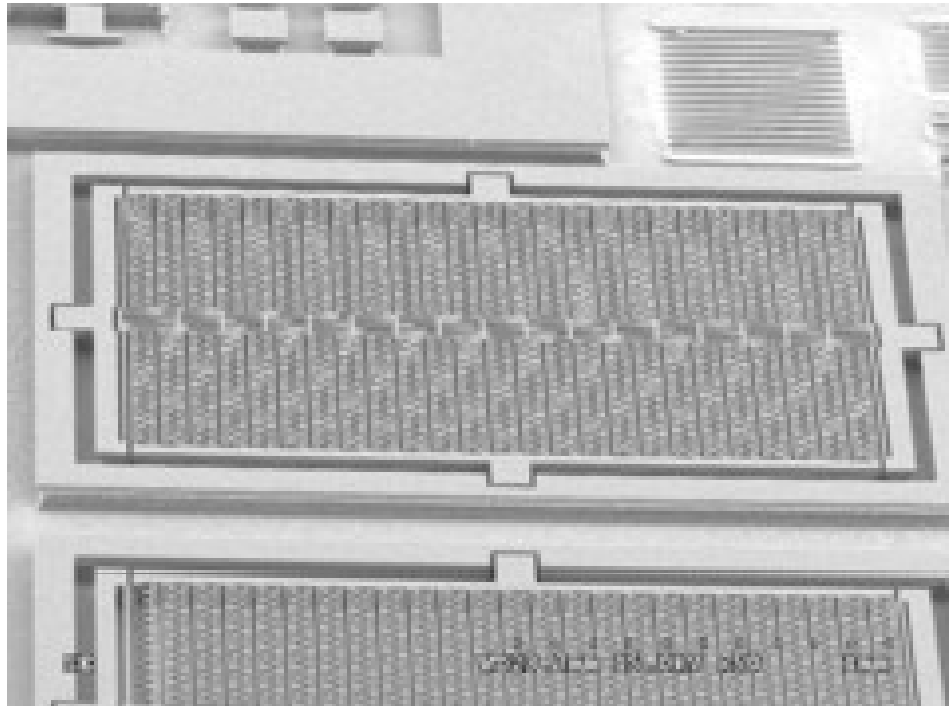
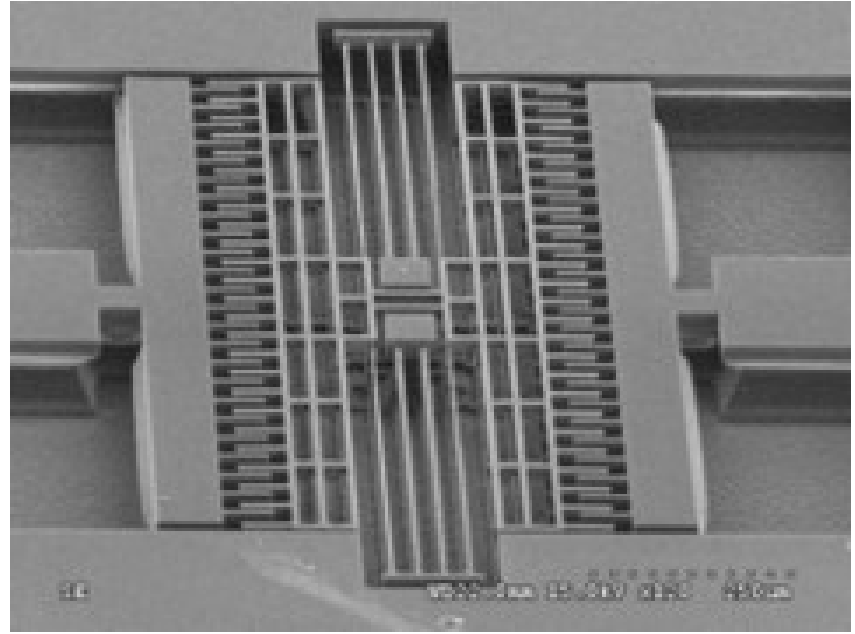
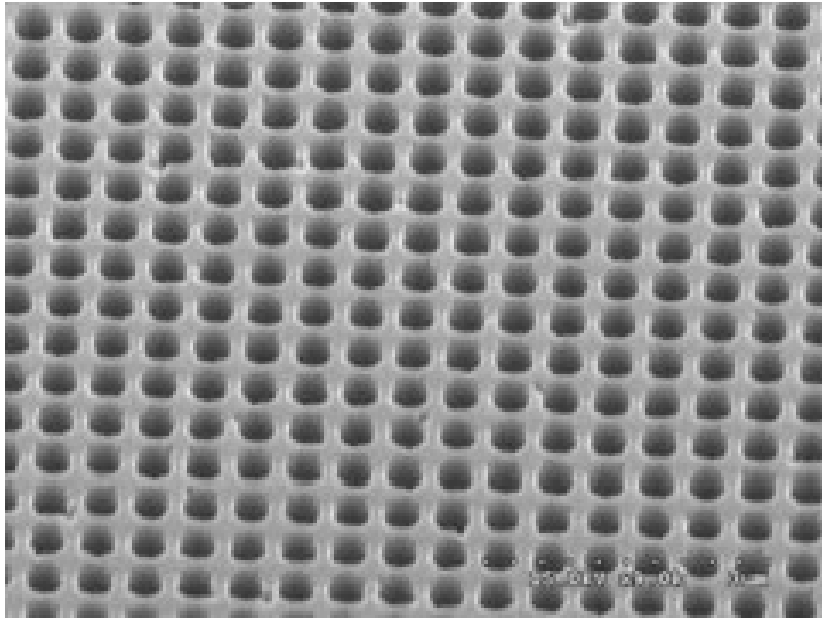
Schematic of ICP Chamber



Application of ICP

- CVD介電質
- 所有圖案化蝕刻製程
- 在金屬沉積前濺鍍清潔
- 金屬電漿PVD
- Dry SCREAM 製程技術：微致動器及懸浮結構等
- 奈米蝕刻製程技術：奈米光學及奈米生醫等





ECR

- ECR是屬於微波電漿設備的一種，以2.45GHz的微波激發氣體分子使之解離而形成電漿，但另外加一磁場於腔體，由軸向磁場產生一與之垂直的電場，電子因而繞磁場做圓周運動，當電子的運動角頻率與微波的波向量變化頻率相同時，則達到"電子迴旋共振"的情形，此時電子能最有效吸收微波能量，大大增加了解離效率。

ECR

- 螺旋轉動頻率 (Gyro-frequency) 或迴旋頻率 (cyclotron frequency) :

$$\Omega = \frac{qB}{m}$$

- 取決於磁場

ECR

- 電子迴旋共振當 $\omega_{MW} = \Omega_e$
- 電子從微波中取得能量
- 電子與原子或分子產生碰撞
- 離子化碰撞產生更多的電子
- 電子沿著磁場線螺旋轉動
- 許多碰撞甚至在低壓中

Illustration of ECR

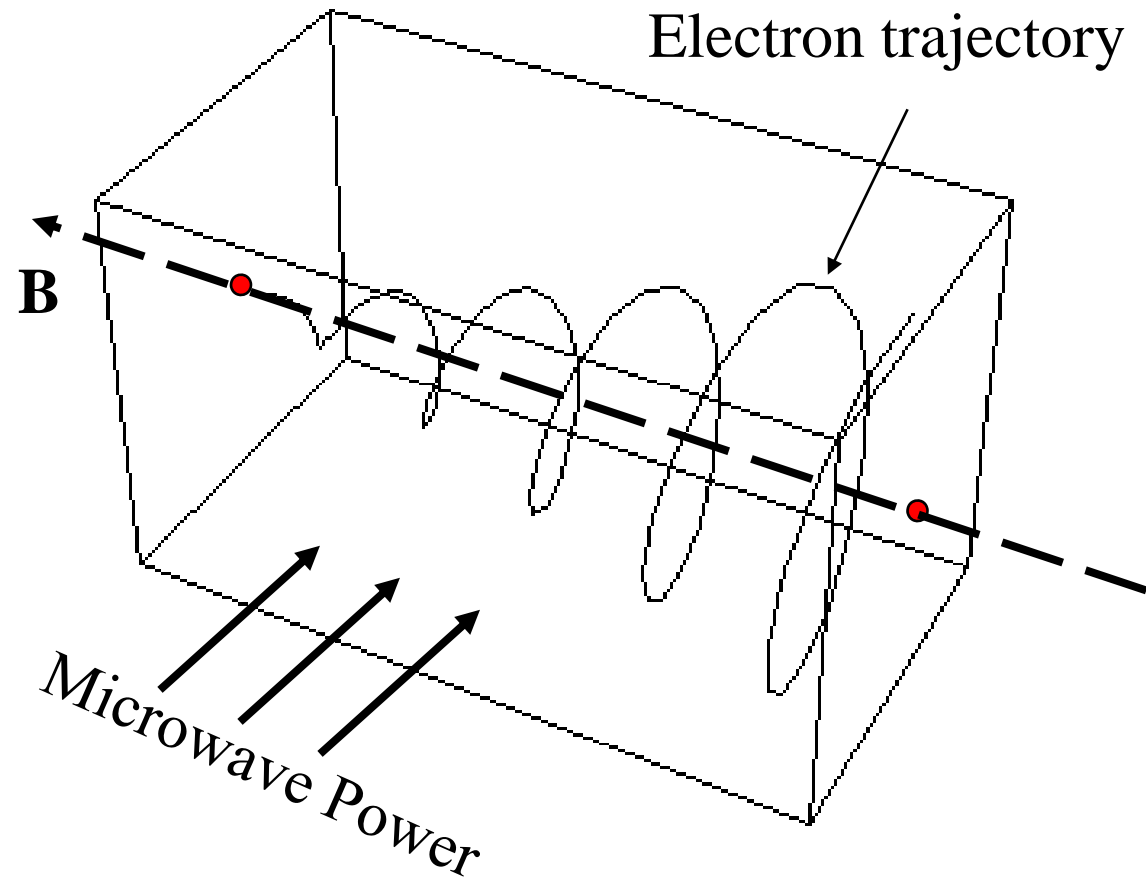
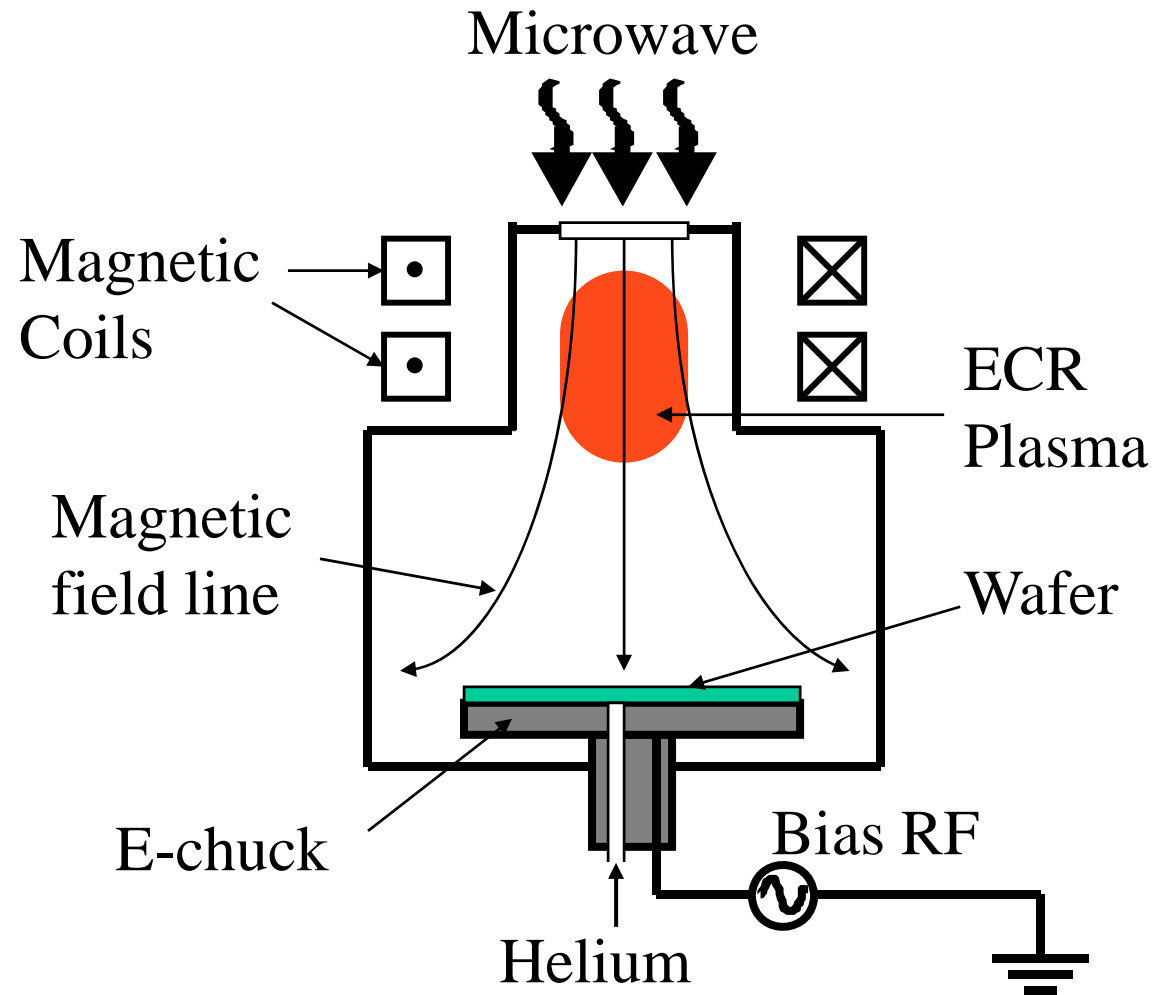


Illustration of ECR



ECR

- 射頻偏壓功率控制離子能量
- 微波功率控制離子流通量
- 磁場線圈電流控制電漿位置及製程均勻性
- 背面氦氣冷卻系統與靜電夾盤控制晶圓溫度

Application of ECR

- CVD 介電質
- 所有圖案化蝕刻製程
- 電漿沉浸離子佈植

Summary

- Plasma is ionized gas with $n_- = n_+$
- Plasma consist of n , e , and i
- Ionization, excitation-relaxation, dissociation
- Ion bombardment help increase etch rate and achieve anisotropic etch
- Light emission can be used for etch end point
- MFP and its relationship with pressure
- Ions from plasma always bombard electrodes

Summary

- Increasing RF power increases both ion flux and ion energy in capacitive coupled plasmas
- Low frequency RF power gives ions more energy, causes heavier ion bombardment
- The etch processes need much more ion bombardment than the PECVD
- Low pressure, high density plasma are desired
- ICP and ECR are two HDP systems used in IC fabrication