



Semiconductor Manufacturing Technology

Chapter 8

Gas Control in Process Chambers

Objective

After studying the material in this chapter, you will be able to:

- Explain why process chambers are used in semiconductor manufacturing
- Describe the benefits of vacuum, the vacuum ranges and appropriate pumps
- Explain the need for gas flow in process chambers and how it is controlled
- Explain what is an RGA and why it is beneficial in process chambers
- Describe what is a plasma and how it is obtained
- Discuss the effects of contamination in chambers and how to minimize it

Functions of Process Chambers

控制晶圓製程環境的關鍵措施：

- 控制化學氣體的流動及反應，確保氣體在接近晶圓的腔室內以精確方式進入並發生反應
- 創建真空環境，減少雜質干擾，提升製程的精確度與純淨度
- 移除不必要的濕氣、空氣及反應副產物，確保晶圓表面環境的潔淨與穩定
- 創造化學反應條件，提供例如電漿反應所需的適宜環境
- 控制晶圓的加熱與冷卻，確保溫度變化符合製程要求，避免熱應力和工藝異常



Functions of Process Chambers

- Etching chamber
 - Dry etching
- Deposition chamber
 - Chemical vapor deposition
- Diffusion chamber
 - Rapidly thermal (process / annealing)
- Ion implantation chamber
 - Ion implantation
- Cleaning chamber
 - Wet bench
 - [RENA Evolution - high throughput fully automated linear wet bench](#)
- Metrology chamber
 - Tunneling electron microscope



Vacuum Bell Jar

- Vacuum bell jar是一種用於創建和控制真空環境的透明或半透明容器，通常由高強度材料（如硼矽酸鹽玻璃、石英或金屬）製成，形狀類似鐘形
- 裝置架構：
 - 材料（高硬度、耐高溫或耐腐蝕等）
 - ✓ 玻璃/石英或金屬（如不鏽鋼）等
 - 密封技術
 - ✓ O ring
 - 真空系統
 - ✓ 多級pumping system且搭配gas sensor偵測真空度
- 優點：
 - 結構簡單
- 缺點：
 - 尺寸限制
 - 大批生產



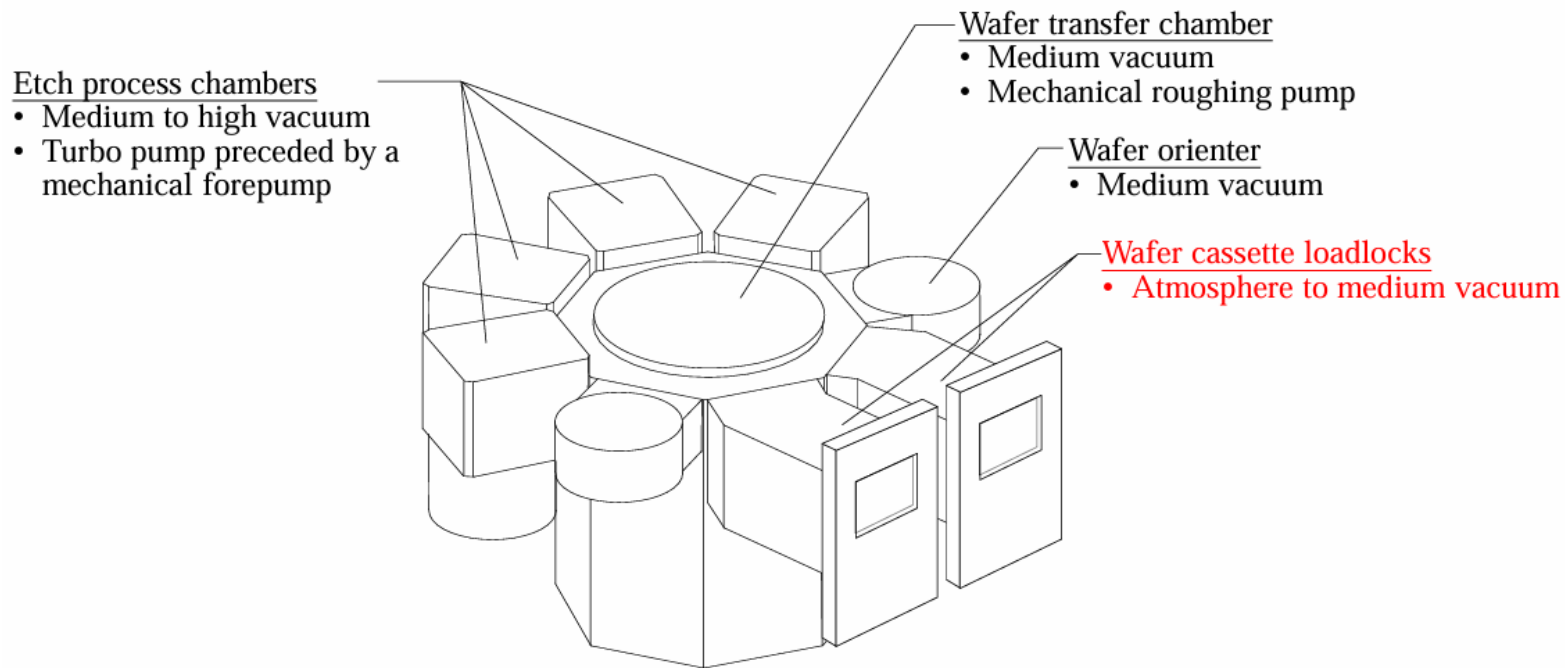
Integrated Cluster Tool

- Integrated Cluster Tool (ICT) 是一種高度整合的半導體製造設備，由多個獨立處理腔室（Process Chambers）和一個中央傳輸模組（Central Transfer Module, CTM）組成，各腔室通過機械手臂（Robot Arm）在真空環境中傳送晶圓（Wafer）
- 實現多步驟製程的無縫銜接，減少晶圓暴露於外部環境的時間
- 裝置架構：
 - 中央傳輸模組（CTM）
 - 處理腔室（Process Chambers）
 - 真空系統
 - 控制系統
- 優點：
 - 製程整合性
 - 高throughput
 - 靈活性
- 缺點：
 - 成本高
 - 技術複雜性
 - 尺寸限制：大型cluster tool佔地大



Cluster Tool Layout with Vacuum Environment

- 晶圓從裝載口（Load lock）進入CTM，機械手臂將其依序送入不同腔室
- 每個腔室執行特定製程（如先CVD沉積絕緣層，再送出process chamber），完成後晶圓返回CTM，再傳輸至下一腔室（如PVD沉積金屬）
- 全程在真空或惰性環境中進行，避免氧化或污染



Process Chamber Gas Flow

基本的製程腔室氣體流動需求如下：




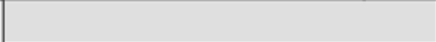
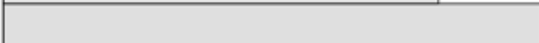
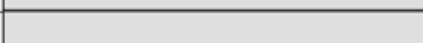
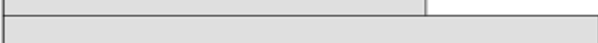


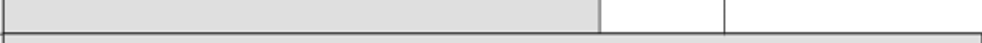

- 能夠處理多種常規和特殊氣體，其中許多氣體具有腐蝕性和毒性
- 對進入製程腔室的氣體流量進行精準且可重複的控制
- 在製程運行期間，能夠控制氣體混合比例
- 腔室內使用的材料不受製程氣體影響，且不會向氣流中引入污染物
- 流速常用單位：每分鐘標準立方公分 (sccm) 或每分鐘標準公升 (slm)

Benefits of Vacuum

Vacuum Condition	Benefit
Create clean environment	Particles, unwanted gases, moisture and contaminants are removed by a vacuum pump.
Low molecular density	Reduce the number of molecules in the system to reduce contamination and to move a gas out of the way (lower molecular interference).
Mean free path	Necessary condition for creating the plasma needed in processes such as sputtering and etch .
Accelerate reactions	Vacuum helps accelerate processes by lowering the vapor pressure of materials, so they can react faster with other chemicals.
Create a force	Vacuum creates a force, such as a vacuum pick-up on a robot arm.

Vacuum Range

The vacuum of deep space is about 10^{-16} torr.

	Vacuum Ranges in Torr				
Wafer Fab Processes	Rough $759 - 10^0$	Medium $10^0 - 10^{-3}$	High $10^{-3} - 10^{-6}$	Ultra High $10^{-6} - 10^{-9}$	Chapter in book
Oxidation					10
Photo					13 - 15
Polish					18
Etch					16
					
Deposition					11
					
Metallization					12
					
Ion Implant					17
					

Vacuum Range

- Oxidation
 - 通常在高溫且接近常壓或低壓的氧氣/水蒸氣環境中進行，並不需要極高真空
- Photolithography
 - 通常在大氣或淨化後的低壓環境中進行，並不需要「高真空」
 - 微影機本身對溫度、濕度、潔淨度要求很高，但並非在超高真空下操作
- Polish
 - 多半在常壓或略低於常壓的情況下操作
- Etch
 - 可分為乾蝕刻 (Dry Etch) 和溼蝕刻 (Wet Etch)
 - ✓ 乾蝕刻常在反應性電漿環境中進行，需要一定程度的真空（通常在中真空到高真空區間），以便產生並維持等離子體，控制蝕刻選擇比與方向性

The vacuum of deep space is about 10^{-16} torr.

Wafer Fab Processes	Vacuum Ranges in Torr				Chapter in book
	Rough $759 - 10^0$	Medium $10^0 - 10^{-3}$	High $10^{-3} - 10^{-6}$	Ultra High $10^{-6} - 10^{-9}$	
Oxidation					10
Photo					13 - 15
Polish					18
Etch					16
Deposition					11
Metallization					12
Ion Implant					17

Vacuum Range

- Deposition
 - CVD 可能在中真空 ($10^{-1} \sim 10^{-3}$ torr) 或低壓 (Low Pressure CVD, LPCVD)，有些甚至接近常壓 (APCVD)
 - PVD (如濺鍍 Sputtering、蒸鍍 Evaporator) 一般在高真空環境下進行 ($10^{-3} \sim 10^{-6}$ torr)
 - ALD 則常在中真空或高真空條件下，以精準控制原子層級的薄膜沉積
- Metallization
 - 一般也屬於「沉積」的一環 (例如金屬濺鍍、電漿增強CVD、金屬蒸鍍等)，需要高真空以確保金屬膜品質
- Ion Implant
 - 需要在高真空到超高真空 ($10^{-5} \sim 10^{-7}$ torr甚至更低) 環境，確保離子束在加速過程中不受過多氣體**碰撞**干擾，以維持高精度和高能量控制

The vacuum of deep space is about 10^{-16} torr.

Wafer Fab Processes	Vacuum Ranges in Torr				Chapter in book
	Rough $759 - 10^0$	Medium $10^0 - 10^{-3}$	High $10^{-3} - 10^{-6}$	Ultra High $10^{-6} - 10^{-9}$	
Oxidation					10
Photo					13 - 15
Polish					18
Etch					16
Deposition					11
Metallization					12
Ion Implant					17

Mean Free Path and Molecular Density

- 需要真空的兩大主因：
- 潔淨
- 足夠的 Mean Free Path
- Mean Free Path（平均自由程）指的是氣體中單位粒子在兩次碰撞之間所能行進的平均距離
- 半導體製程常在高真空或超高真空環境下進行，以確保平均自由程足夠長，從而達到預期的效果

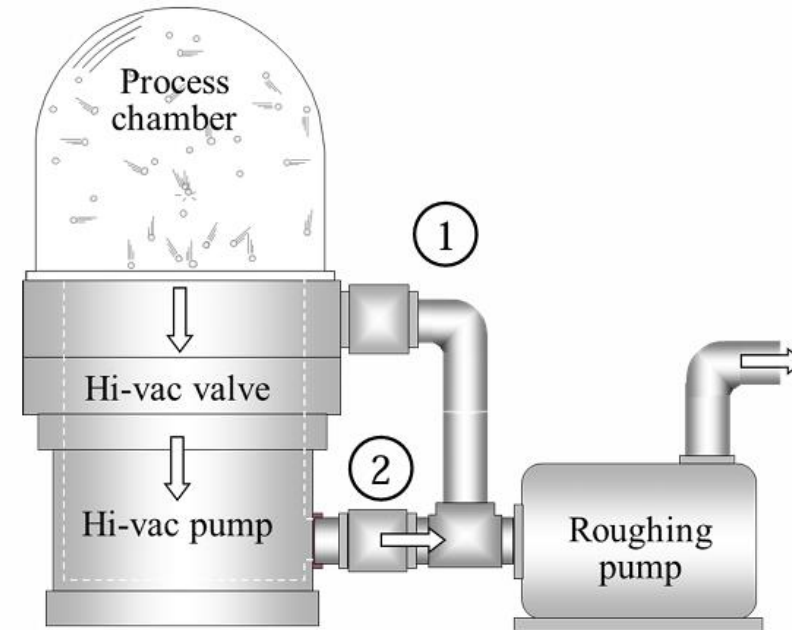
$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 P} = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma N}$$

σ ：單個粒子的有效碰撞截面積
 N ：每單位體積內的粒子數量

	760 Torr (atmosphere)	1×10^{-3} Torr	1×10^{-9} Torr
# of molecules/cm ³	3×10^{19} (30 million trillion)	4×10^{13} (40 trillion)	4×10^7 (40 million)
Mean free path	2×10^{-6} in	2-in	30 miles

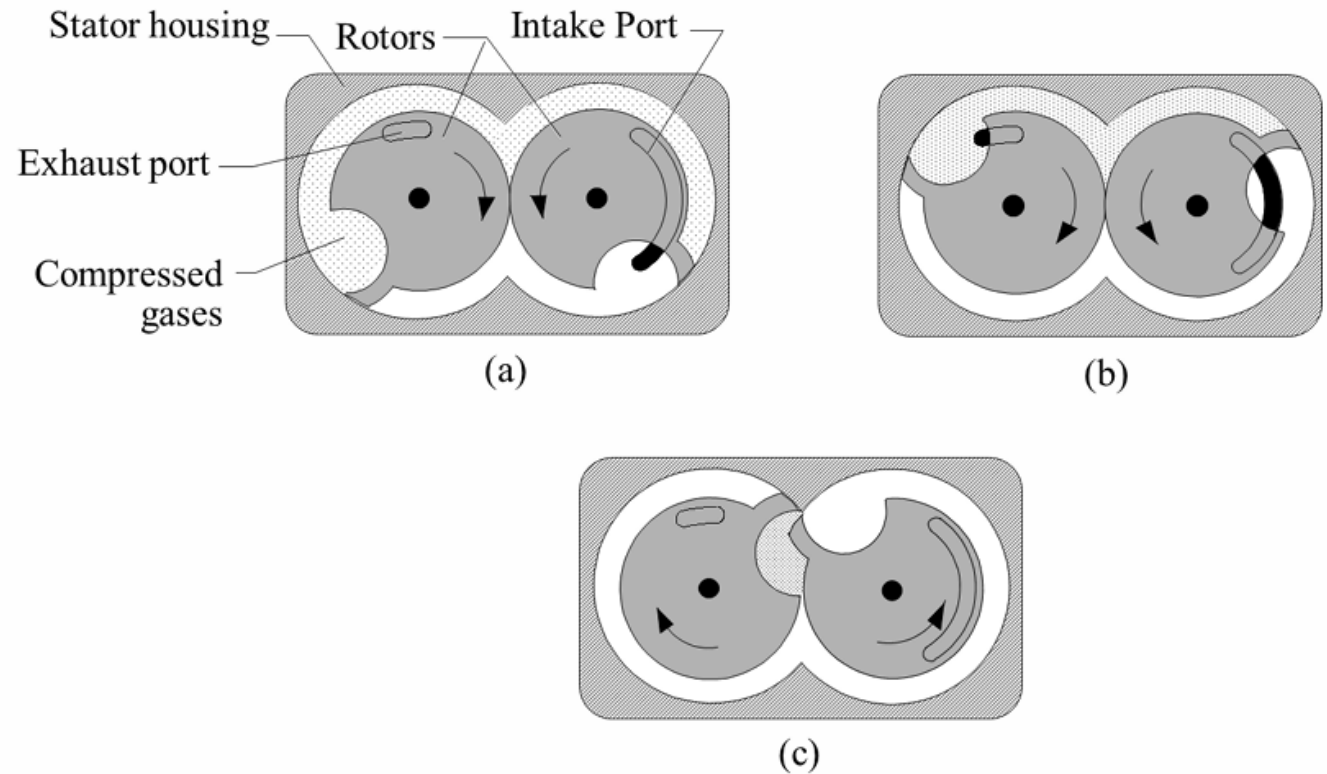
Roughing Pump Exhausting a High-Vac Pump

- 粗真空泵 Roughing pump：從大氣壓降低到中等真空範圍 ($10^3 - 10^{-3}$ Torr)，真空系統中的第一級泵，負責初步抽氣
- 高真空泵 High vacuum pump：用於將粗真空進一步抽到高真空或超高真空範圍 ($10^{-3} - 10^{-9}$ Torr) 的裝置，通常與粗真空泵一起使用
- 先啟動前級幫浦，將系統壓力降至一定範圍 (10^{-3} Torr)，然後啟動高真空幫浦
- [TRIVAC B - Function principles](#)



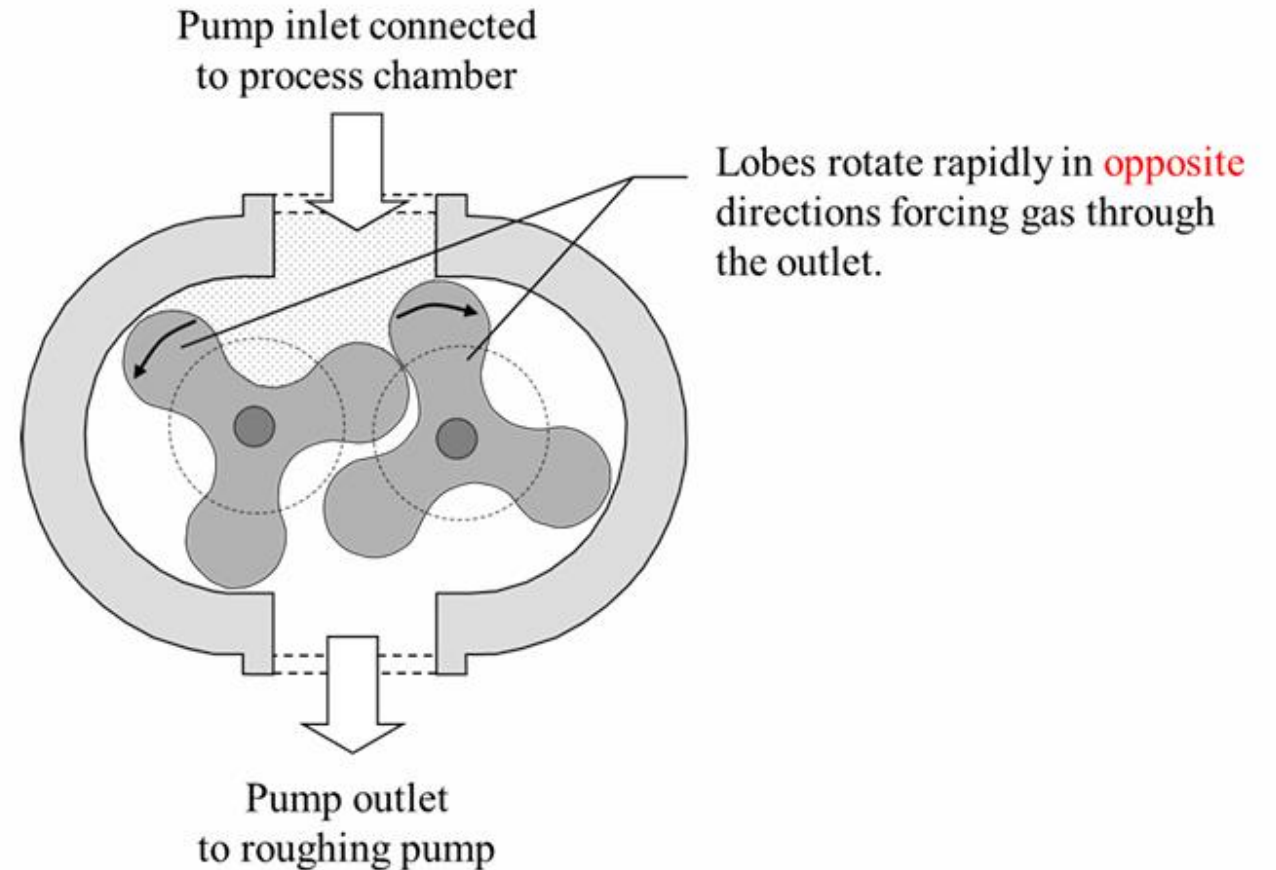
Rotary Claw Dry Mechanical Pump

- 旋轉爪式干式機械泵：無油的機械真空泵，廣泛應用於需要清潔真空環境的工業和科學領域，通常用於粗真空和中真空的應用， $10^{-1} \sim 10^{-3}$ torr
- 乾式爪式真空泵浦的工作原理



Roots Blower Pump

- 羅茨鼓風機：用來增加系統內氣流速度的機械裝置，因為是等容積輸送，氣體在腔內不壓縮，所以不能單獨使用，其壓力完全取決於下游系統的阻力，通常協助其他真空幫浦更有效地抽取氣體
- [Vacculex - Roots vacuum pump](#)

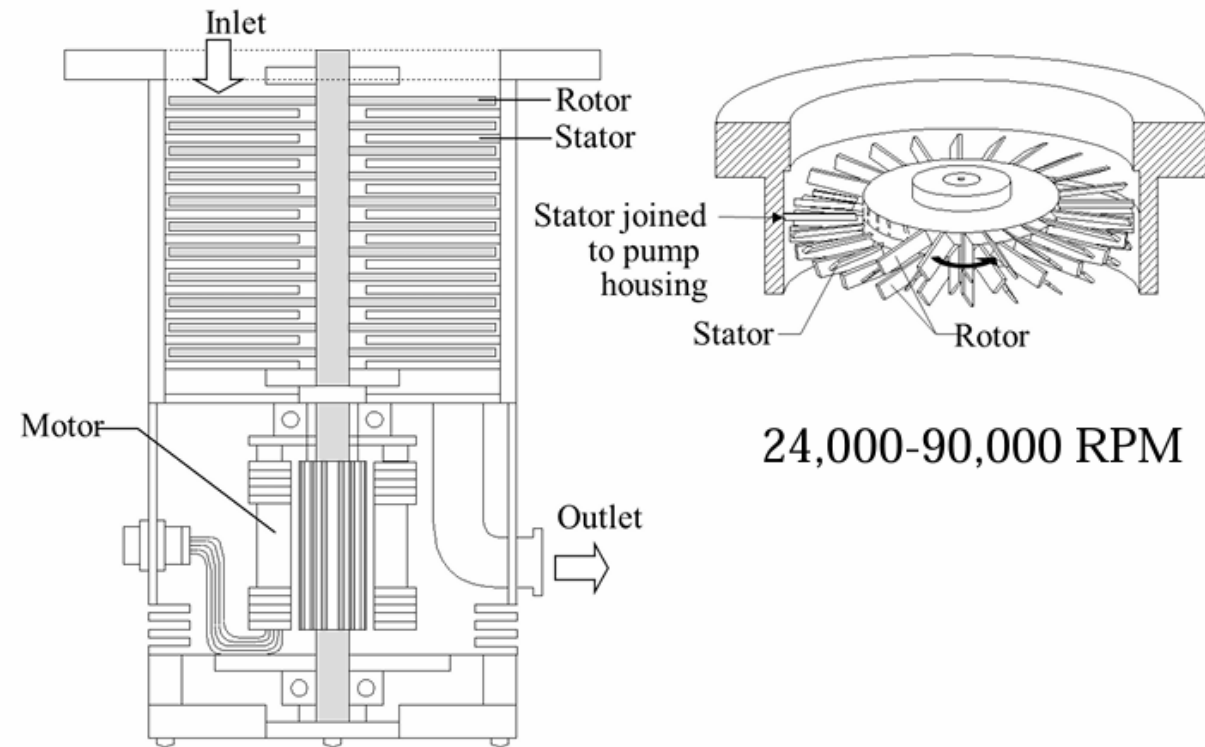


Comparison

	Rotary Claw Dry Mechanical Pump	Rotary Claw Dry Mechanical Pump
工作目的	單級或多級壓縮，可直接從大氣壓抽至高真空（如 7.5×10^{-4} Torr）	無內壓縮，僅輸送氣體，需搭配前級泵（如旋片泵）排出至大氣壓
潤滑方式	完全乾式運行	乾式設計（現代版本），部分舊型號可能需潤滑軸承
極限真空度	高（可達 7.5×10^{-4} Torr 以下）	較低（通常在 7.5×10^{-3} Torr ~ 7.5 Torr 範圍內）
抽氣速率	中等到高	極高，適合大流量氣體輸送
能耗	較高（需克服高壓縮比）	較低（僅輸送氣體，無壓縮能耗）
成本	高	結構簡單，成本低

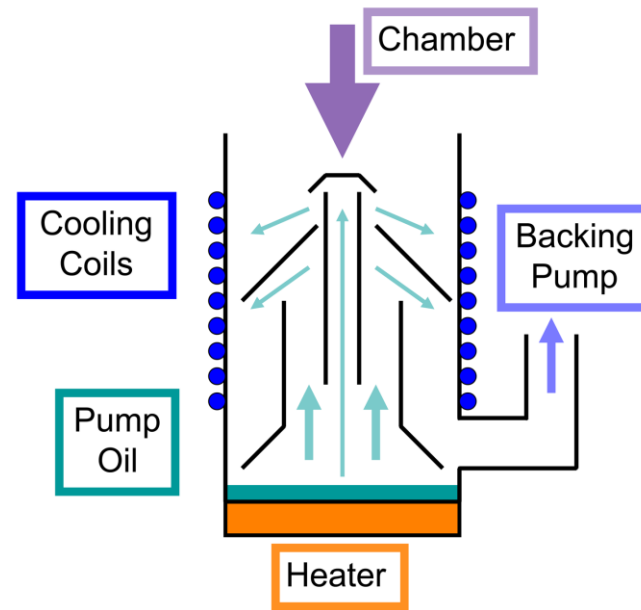
Turbomolecular Pump

- 分子渦輪泵：用於將系統的壓力從粗真空進一步降低到高真空 (10^{-3} - 10^{-9} Torr) 的範圍
- 利用葉片的高速旋轉與分子的運動方向相互作用，將氣體分子推向出口
- [Functional principle of the HiPace turbopump in 3D](#)



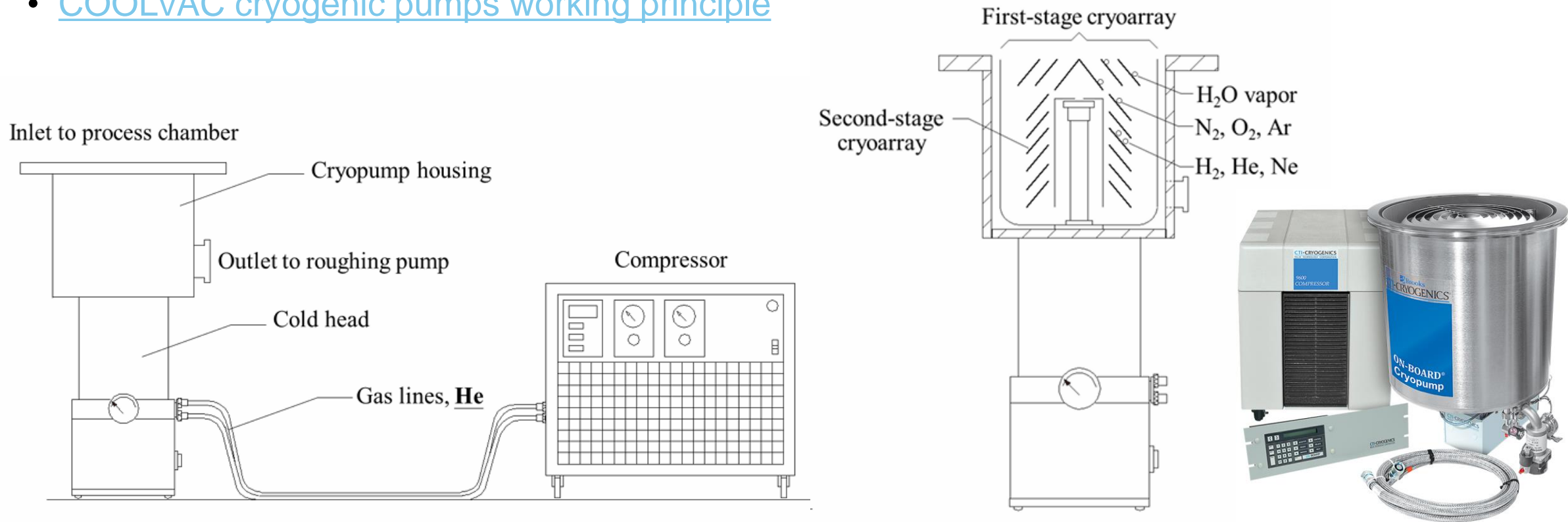
Diffusion pump

- 擴散泵（Diffusion Pump）是一種無機械運動部件（如扇片）的高真空泵，依賴高速噴射的油蒸氣分子將氣體分子從真空腔室帶走，從而實現真空環境
- 核心組件：
 - 加熱器
 - 噴嘴組
 - ✓ 將蒸氣向上高速噴射，形成向下擴散的蒸氣流
 - 冷卻系統
- 優點：
 - 極高真空能力：可達 10^{-8} Torr
 - 無振動與微粒
 - 低維護成本：結構簡單，僅需更換工作液
- 缺點：
 - 油氣污染風險
 - 啟動時間長：需要加熱工作液
 - 高耗能



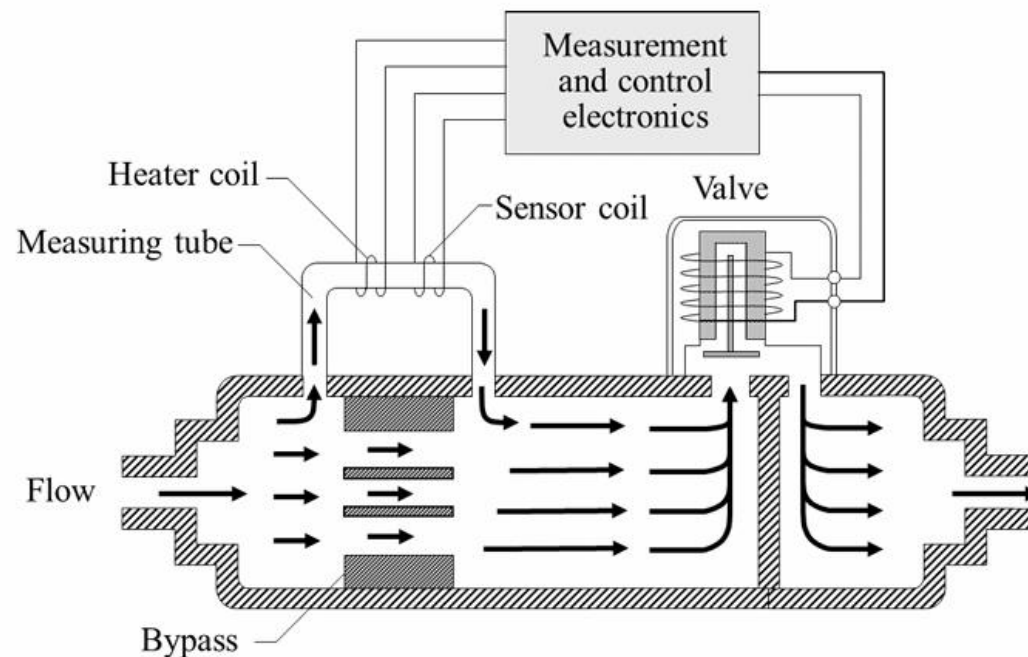
Cryopump Compressor and Pump Module

- 冷凝泵：將氣體分子冷卻到極低溫度，使其凝結或吸附在冷表面上，從而實現氣體分子的去除，提供高真空環境 (10^{-6} - 10^{-9} torr)，是一種無機械運動部件、無油污染的真空泵
- 第一級冷頭 (80K) 捕獲水蒸氣和碳氫化合物；第二級冷頭 (10K) 捕獲氮、氧、氫、氦等
- [COOLVAC cryogenic pumps working principle](#)



Mass Flow Controller

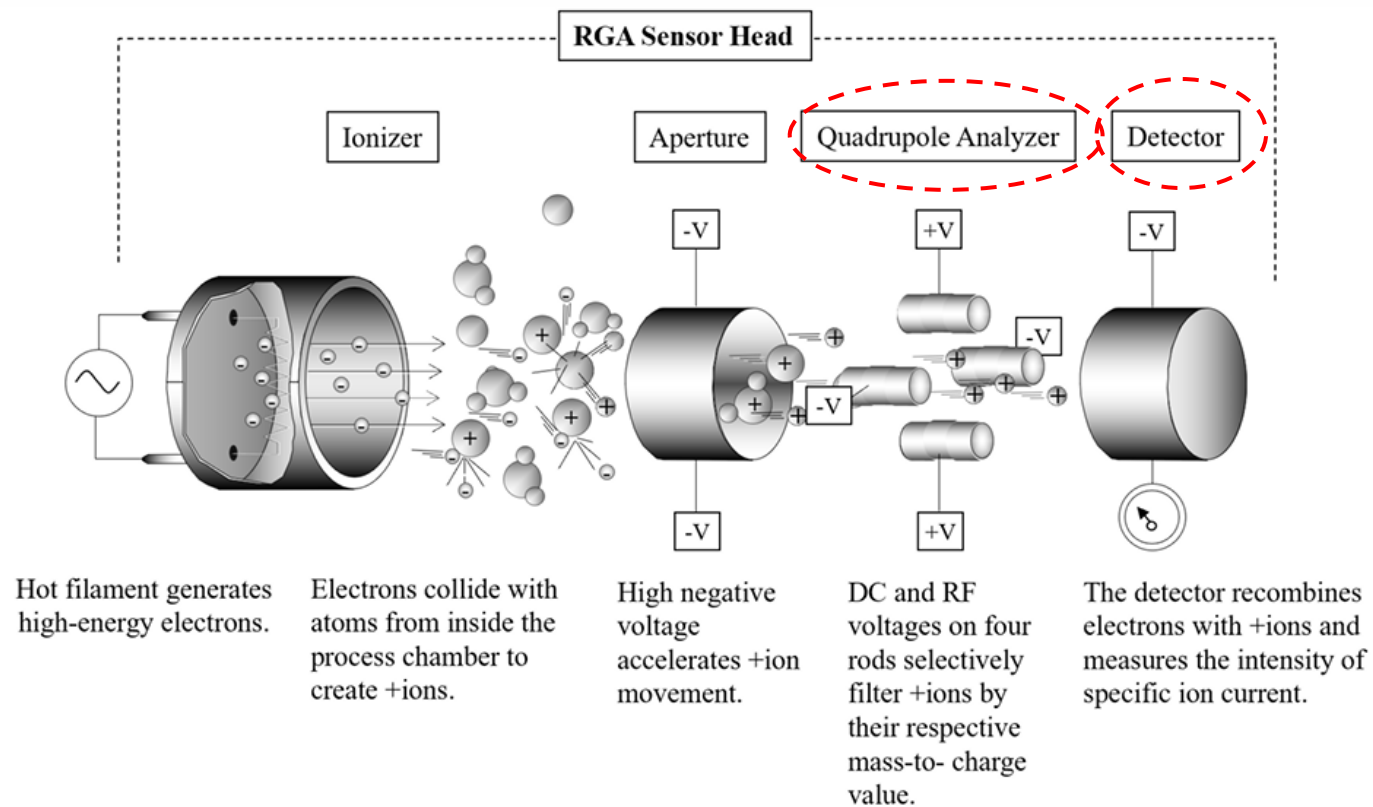
- MFC：控制氣體流量的裝置，保持穩定和精準的氣體供應
- 流量傳感器：基於熱導原理，氣體通過加熱元件時的溫度變化，該變化與氣體流量成正比
- 控制電路比較實際流量與設定值，並調節控制閥的開度以實現精準控制
- [Thermal Mass Flow Meter / Controller \(Principle of operation\)](#)



(Photo courtesy of MKS Instruments, Inc.)

Residual Gas Analyzer

- RGA 是基於質譜技術的設備，用於分析真空系統中的殘餘氣體成分，能檢測和量化氣體分子的種類及濃度，通常用於監測環境中的污染物、洩漏和製程氣體的組成
- [TSQ Quantis™ Triple Quadrupole Mass Spectrometer](#)



Quadrupole Mass Filter

- 四極質量分析器：直流電壓 (DC) 和高頻交流電壓 (RF) 施加在四根桿上，產生隨時間變化的非均勻電場，此電場會對通過的離子施加力，影響其運動軌跡，因此分離不同質荷比的離子
- 分離後的離子被法拉第杯或電子倍增器收集，根據電流信號的強度來定量氣體的濃度
- [Fundamentals of MS \(4 of 7\) - Quadrupoles](#)

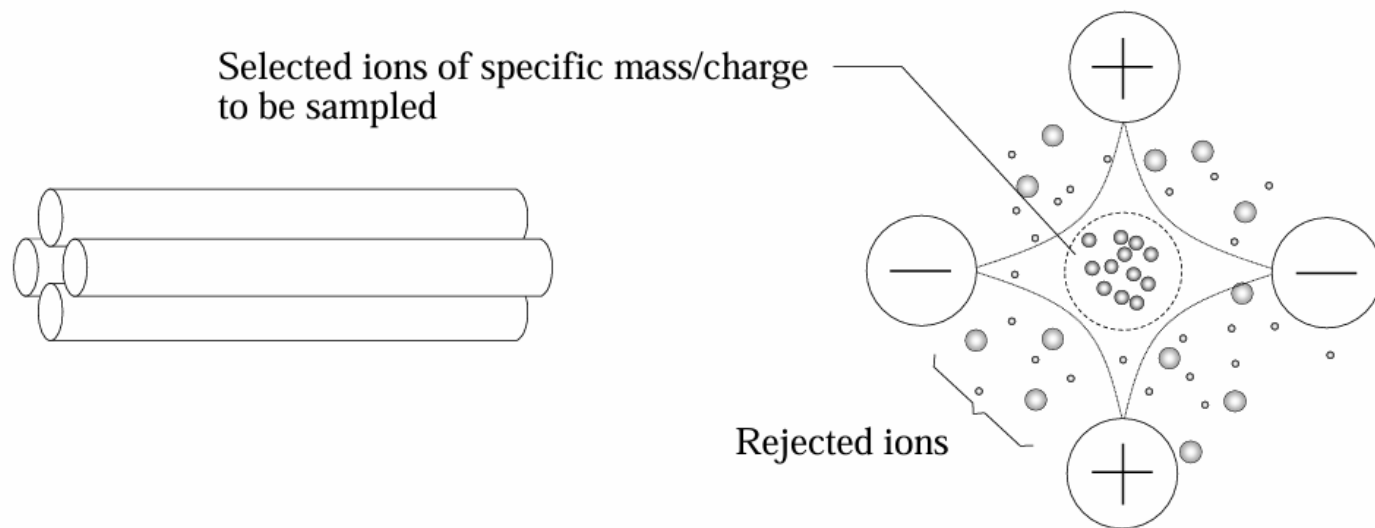
Mathieu震動方程 $\frac{d^2y}{dx^2} + [a - 2q \cos(2x)] y = 0$

其中：

- a 和 q 是常數參數，
- $\cos(2x)$ 表示週期性驅動項，
- $y(x)$ 是未知函數。

$$y(x) = e^{i\mu x} \phi(x)$$

$$a = \frac{4eU}{mr_0^2\Omega^2}, \quad q = \frac{2eV}{mr_0^2\Omega^2}.$$



Mass spectrometer

- 質譜儀是一種用於分析物質成分的精密儀器，通過將樣品離子化後按質荷比（ m/z ）分離並檢測，廣泛應用於半導體製程、化學分析、生物醫學等領域

- 核心組件：

- 離子源

- ✓ 電子轟擊

- 質量分析器

- 真空系統

- ✓ 維持 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ Torr 的高真空，避免離子與氣體分子碰撞

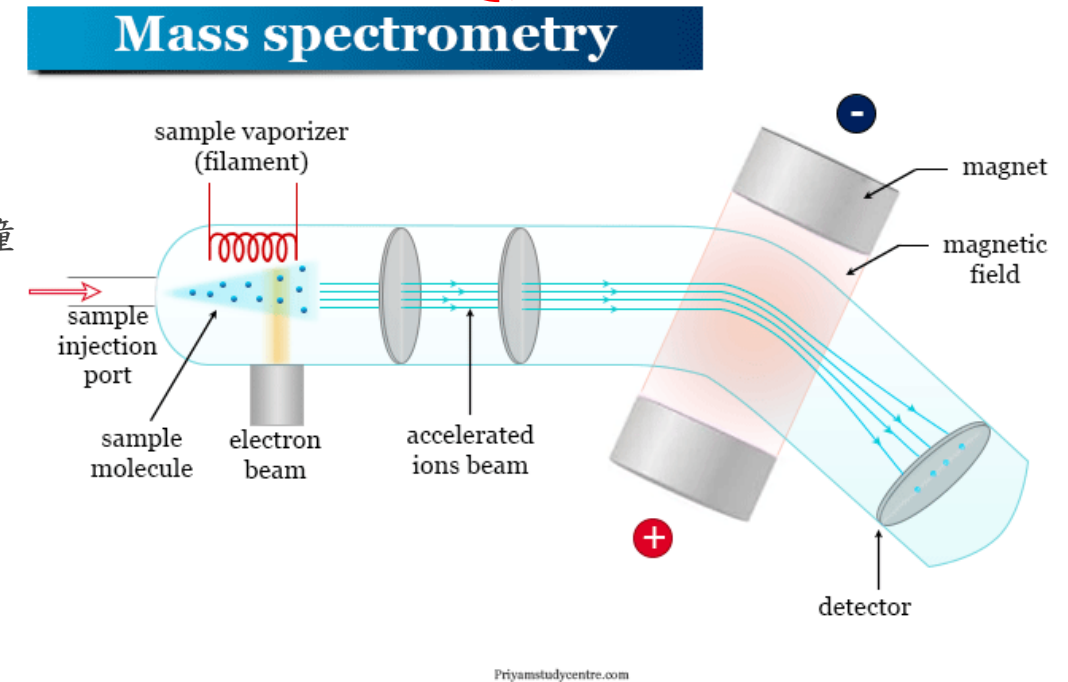
- 應用：

- 殘留氣體分析

- 表面污染檢測

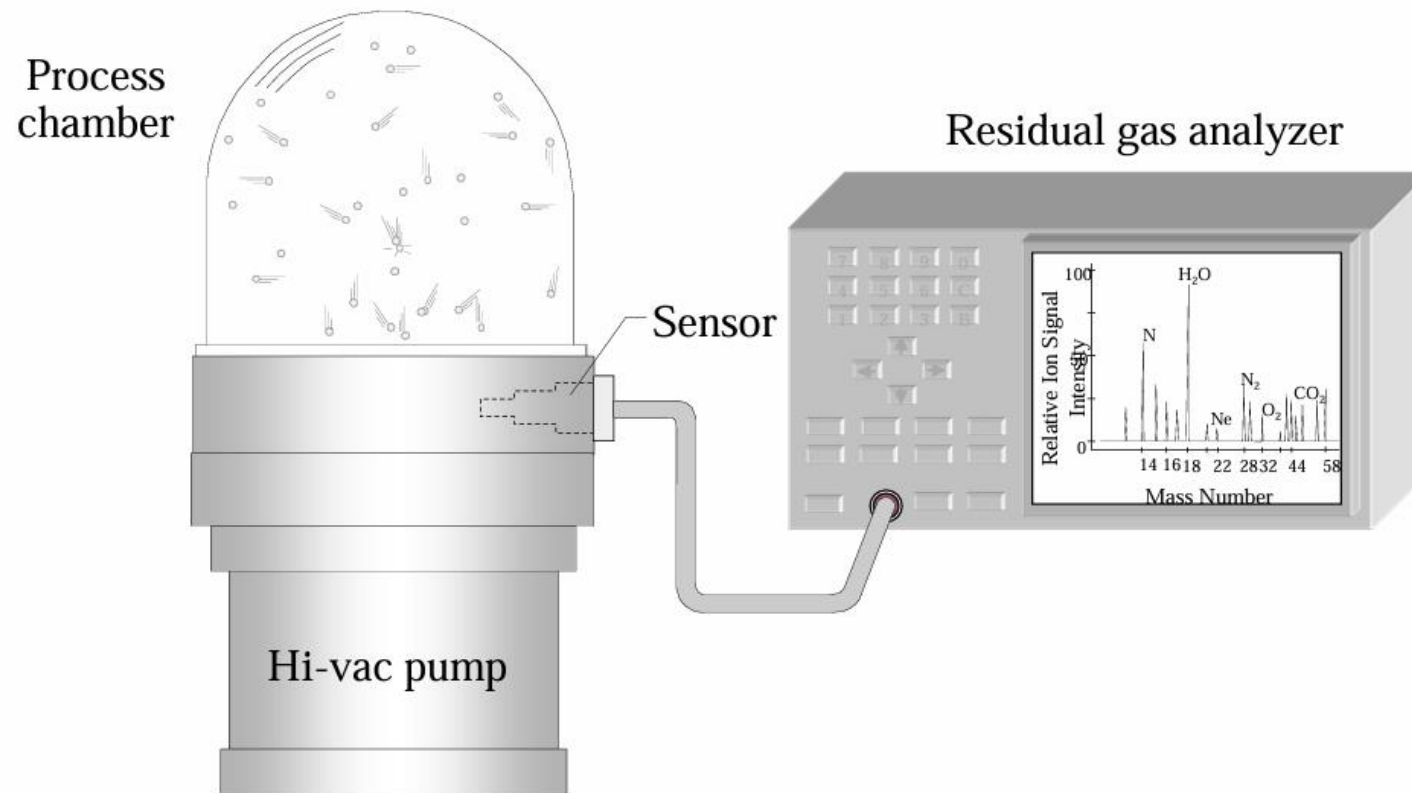
- 材料或參雜濃度檢測

$$r = \frac{mv}{qB}$$



RGA Measurement of a Process Chamber

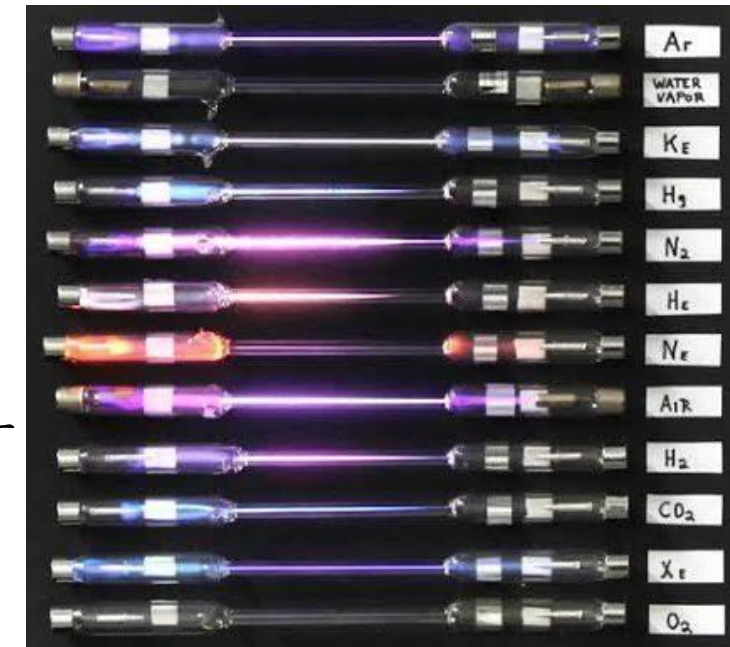
- 即時得到反應室內的清潔度資訊
- 檢測殘餘氣體和洩漏、分析氣體樣品、檢測製程氣體和污染



$$\frac{mv^2}{r} = qBv$$

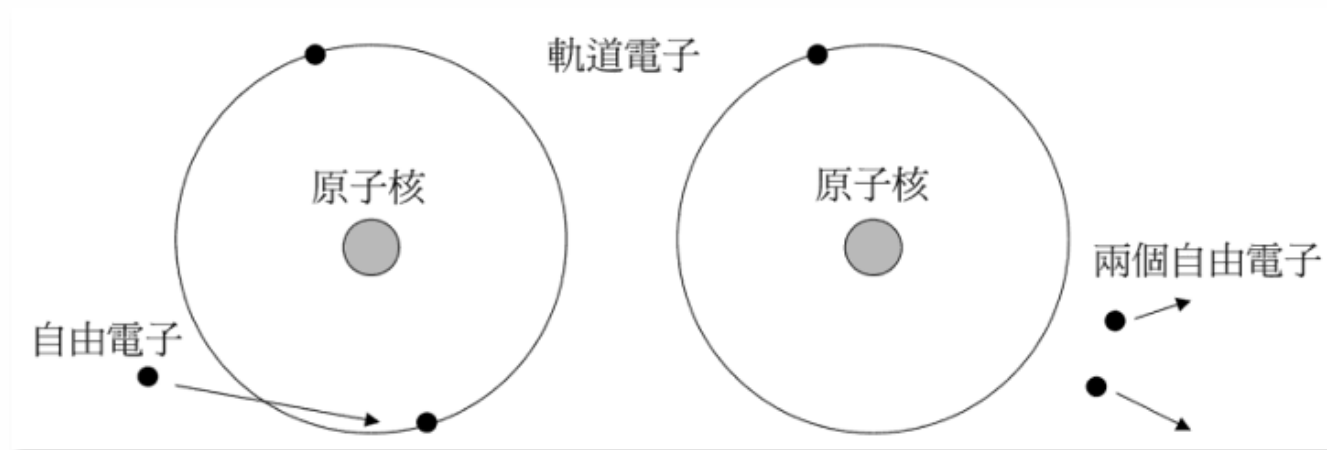
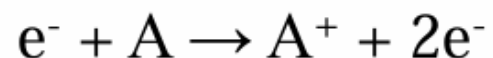
Basic concept of plasma

- 電漿被廣泛定義為具有等量正電荷和負電荷的離子氣體，由中性原子或分子、自由電子和正電離子組成，電子濃度和離子濃度相等
- 電離率= $n_e / (n_e + n_n)$ ，其中電子濃度 n_e 、中性原子或分子濃度 n_n
- 電離率主要取決定於電子能量和氣體種類，太陽中心溫度極高 ($10,000,000^\circ\text{C}$)，因此幾乎所有氣體分子都被離子化，電離率幾乎為100%
- 常見的形成方式:
 - 直流放電電漿
 - 射頻電漿
 - 微波電漿
 - 感應耦合電漿 (ICP, Inductively Coupled Plasma)
- 半導體製造使用的電漿電離率通常很低
 - HDP CVD: 平行電極反應室所產生的電離率大約為百萬分之一到千萬分之一
 - Etch: 平行電極的電漿蝕刻反應室，電離率為0.01%左右
 - HDP Etch: 感應式耦合電漿 (ICP) 和電子迴旋共振 (ECR)，電離率約為1-5%



Ionization

- 當電子與原子或分子碰撞時，會將部分能量傳遞給受原子核或分子核束縛的軌道上。如果軌道電子獲得的能量足以脫離核的束縛，就會變成自由電子
- 這個過程稱為電子衝擊電離 (Impact Ionization)
- 離子化是非常重要的，因為它將產生並維持電漿



Excitation and Relaxation

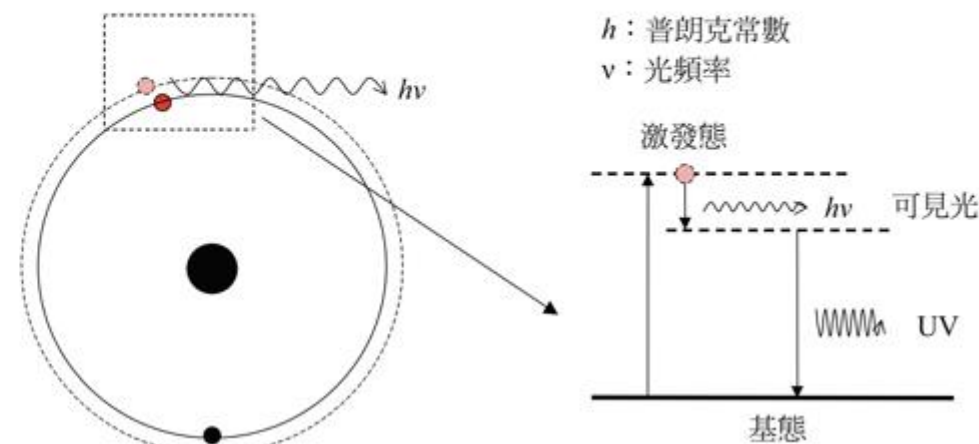
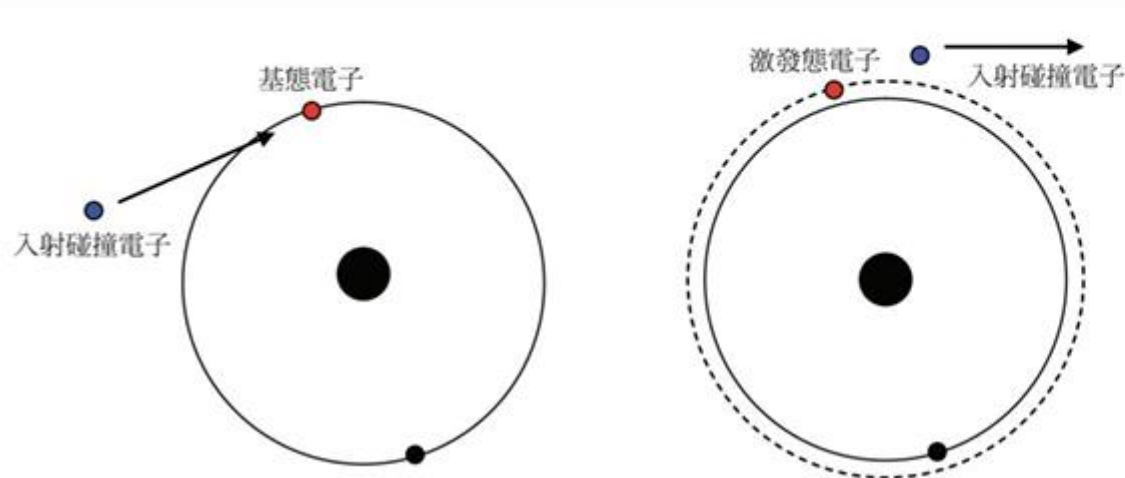
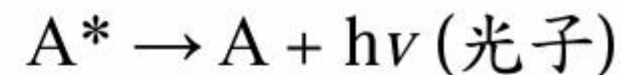
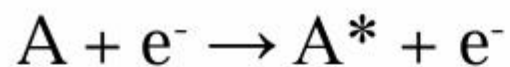
- 基態電子接受能量後會跳至激發態，激發態不穩定且短暫，不能在較高的軌道層停留太久，落回到基態的過程稱為鬆弛。
- 不同原子或分子有不同的軌道結構和能階，因此發光頻率也就不同，例如氧氣發出的光呈灰藍色，氮氣為粉紅色，氖氣是紅色，而氟氣為橘紅色
- 監測電漿的發光變化決定蝕刻或其他電漿過程的終點



Fig. 9 Argon

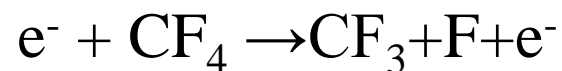
Fig. 10 Oxygen

Fig. 11 Hydrogen

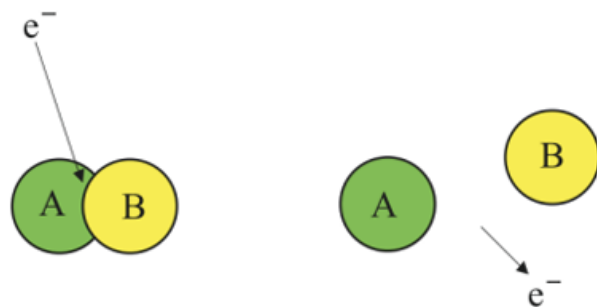
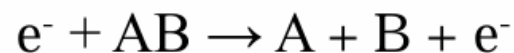
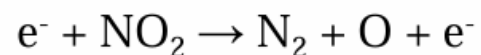
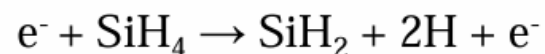


Collision and Decomposition

- 當電子和分子碰撞時，如果因碰撞傳遞到分子的能量比分子的化學鍵能量高時，就能打破化學鍵產生自由基 (Free Radicals)
- 氟碳氣體在電漿中被用來產生自由的氟自由基



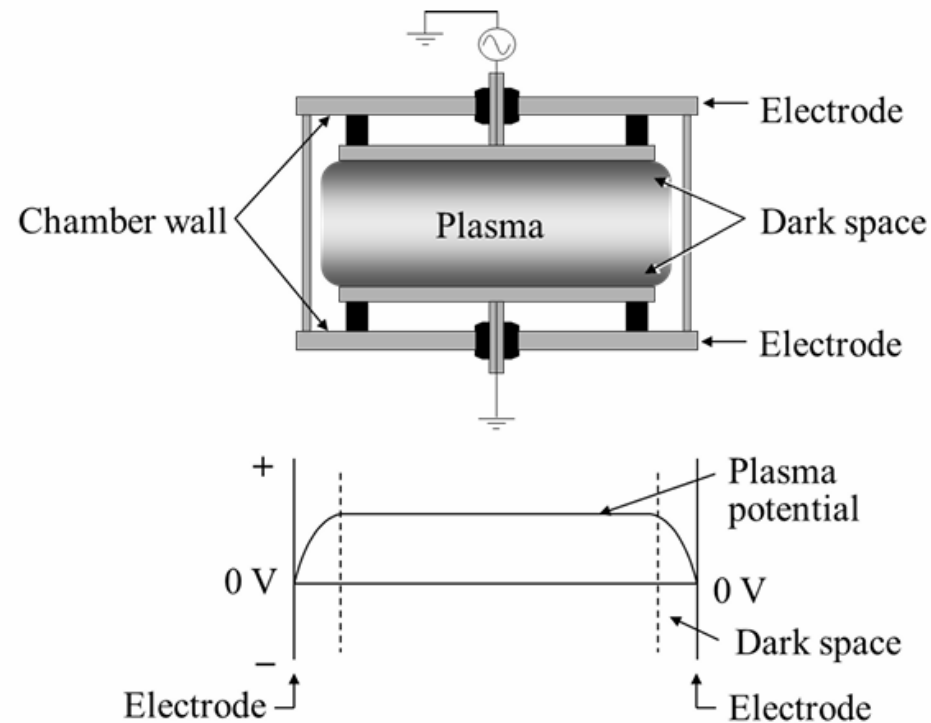
- 使用源材料矽烷 (SiH_4) 和氧前驅氮氧化物 (NO_2) 產生自由基



碰撞	副產品	所需的能量
$e^{-} + SiH_4 \rightarrow$	$SiH_2 + H_2 + e^{-}$	2.2 eV
	$SiH_3 + H + e^{-}$	4.0 eV
	$Si + 2 H_2 + e^{-}$	4.2 eV
	$SiH + H_2 + H + e^{-}$	5.7 eV
	$SiH_2^{*} + 2H + e^{-}$	8.9 eV
	$Si^{*} + 2H_2 + e^{-}$	9.5 eV
	$SiH_2^{+} + H_2 + 2 e^{-}$	11.9 eV
	$SiH_3^{+} + H + 2 e^{-}$	12.32 eV
	$Si^{+} + 2H_2 + 2 e^{-}$	13.6 eV
	$SiH^{+} + H_2 + H + 2 e^{-}$	15.3 eV

Plasma Electrode Configuration

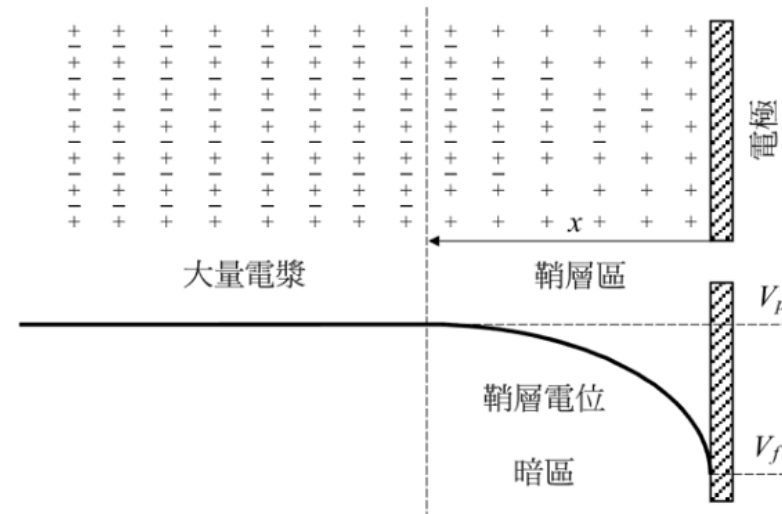
- 電容耦合型電漿源：直流偏壓（離子佈值、PVD）、交流偏壓（CVD、ETCH）
- 電極表面累積負電荷：由於電子比正離子更輕且移動更快，它們會迅速從電漿中逃逸並沉積在電極或物體表面，導致表面為低電位形成鞘層（sheath）
- 電極表面的負電荷會吸引正離子，同時排斥電子，因此鞘層內較少碰撞，形成暗區



RF: 13.56 MHz,
Microwave: 2.45 GHz

Ion Bombardment

- 正電荷與負電荷的累積在電極附近造成鞘層電位，鞘層電位將離子加速向電極移動，並造成離子轟擊。將一片晶圓放在電極上方，就可利用離子加速使晶圓表面受到轟擊
- 射頻頻率會影響離子的能量
- 例如在13.56MHz高頻下，電子將吸收多數能量而離子保持冷凍靜止，因為離子響應速度較慢無法及時跟上電場的快速變化。頻率較低如350kHz時，雖然大多數能量仍由電子吸收，但在變化緩慢的交流電場中，離子卻有機會從射頻功率中獲得能量，因此離子會被加速得更快，從而在轟擊晶圓表面時帶有更高的動能



$$E = \frac{1}{2} m_i v^2 = qV$$