

# 飛行時間二次離子質譜儀的原理 與應用

## The Principle and Applications of Secondary Ion Mass Spectrometer

陳清源、麥富德、凌永健

Ching-Yuan Chen, Fu-Der Mai, Yong-Chien Ling

飛行時間二次離子質譜儀可同時分析微量有機分子與無機元素，可分析氫原子到分子量上萬的合成與天然物高分子，可區別質量解析能力相差高達 10000 的待測物，具百萬分之一到十億分之一原子濃度的靈敏度，由調整一次離子強度，可分析固態樣品表面單一層原子或分子，以鎵離子槍進行化學離子影像分析，側面解析度達 100 奈米以下，具奈米縱深分析解析度，研究範圍涵蓋微電子技術、奈米科技、合成高分子、生命科技材料、環境分析、醫藥技術與臨床分析等，是可同時提供樣品多項化學資訊的多功能分析儀器。

Time-of-flight secondary ion mass spectrometer (TOF-SIMS) is capable of simultaneously analyzing trace organic molecules and inorganic elements in mass ranging from hydrogen atom to synthetic and natural polymers with molecular weight up to ten thousands and more. TOF-SIMS could distinguish analytes with mass resolution different by 10000 at ppma to ppba sensitivity. Top monolayer atomic or molecular information could be determined by adjusting primary ion current density. Chemical images with lateral resolution less than 100 nm can be obtained by using Ga<sup>+</sup> ion gun. The nm-scale depth profile and sub- $\mu\text{m}$  area analysis capabilities inherent in TOF-SIMS extend its applicability to broad fields such as microelectronics, nano-technology, polymer science, life science technology, environmental analysis, medical technology and clinical diagnostics. TOF-SIMS could simultaneously provide critical chemical information and is a multi functional state-of-the-art instrument.

### 一、前言

二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectrometer, SIMS)<sup>(1)</sup> 目前已廣泛應用於各個不同的研究領域，大部分是在半導體工業與光電產業中，成為製

程研發及故障分析與品管不可或缺的材料分析儀器。二次離子質譜儀依質量分析器的不同可區分為扇形磁場式 (magnetic-SIMS)、飛行時間式 (time-of-flight SIMS, TOF-SIMS) 及四極柱 (quadrupole-SIMS) 三種。扇形磁場式與飛行時間式都提供相當

好的質量解析能力 ( $M/\Delta M$ ) > 10000 以上，可排除絕大部分的質量干擾。但由於扇形磁場使用的一次離子能量與二次離子汲取能量較飛行時間式高，較不利於淺層縱深分析，在分析前需先選定特定離子監測，較適合應用於已知結構及需分析深度較深的樣品。TOF-SIMS 具有高的離子傳輸率 (> 50%)，可有效降低偵測極限，其平行全質譜掃描 (parallel scan) 的功能可儲存更多樣品的資訊，留待後續的資料處理與重建，相當適合未知樣品的分析 (如製程中的未知污染)，可與扇型磁場式互補。另外由於一次離子為脈衝式，電荷累積效應較小，在脈衝間隔以電子槍加上適當的電荷補償，使 TOF-SIMS 可應用在不良導體的分析，目前有相當多的應用，例如在生物細胞組織、合成高分子、環境樣品的分析上。本文將介紹 TOF-SIMS 的基本原理及應用實例，以提供讀者瞭解並應用於相關研究上。

## 二、飛行時間二次離子質譜儀簡介

### 1. TOF-SIMS 起源與發展

自從 1980 年代初期，德國 Benninghoven 教授

在 University of Münster 的研究團隊首先將飛行時間質量分析器與二次離子質譜術結合，開啟 TOF-SIMS 在各研究領域上的應用，其間經過數次的研究改良，使硬體操作更加簡便並具有自動化分析的功能。隨著電腦的快速發展，在數據資料及影像的處理上更為快速，人性化軟體操作介面使 TOF-SIMS 更趨完善。

### 2. TOF-SIMS 基本原理簡介

TOF-SIMS 利用脈衝式一次離子源 (脈衝時間 0.6 - 100 ns、脈衝間距 50 - 300  $\mu$ s、能量 0.1 - 20 keV)，經過電場加速並聚焦後撞擊真空腔 ( $1 \times 10^{-9}$  -  $1 \times 10^{-10}$  Torr) 中的固態樣品表面 (圖 1)，帶有能量之入射離子進入樣品中進行多種能量轉移作用。靠近樣品表面 10 Å 內粒子若獲得能量大到足夠克服樣品表面束縛能，將脫離樣品表面，其中大部分為中性粒子，約有 1% 形成離子 (稱二次離子)，再由汲取電極將離子加速並導入漂移管中。不同質量離子獲得相同動能，但因質量不同所以飛行速度不同，到達偵檢器的時間不同，藉此區分不同荷質比的離子。

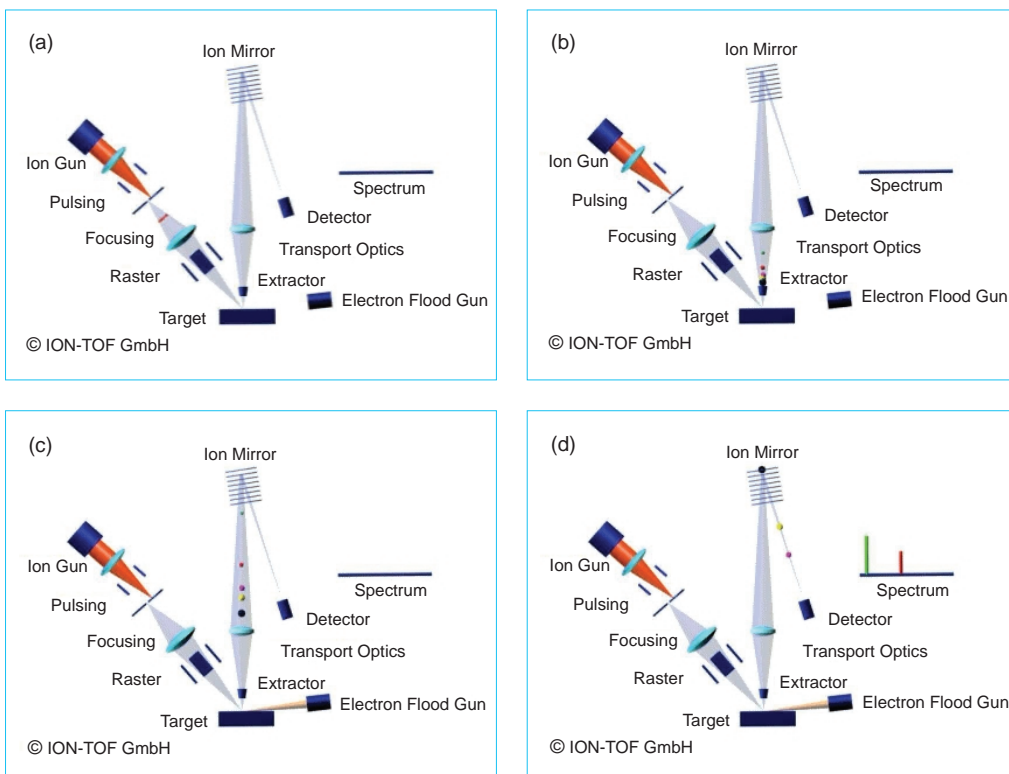


圖 1.

(a) 一次離子以脈衝方式產生，(b) 經電場加速聚焦撞擊待測樣品表面生成二次離子，(c) 二次離子經汲取電極導入漂移管中，(d) 不同質荷比離子飛行速度不同，先後抵達偵檢器。

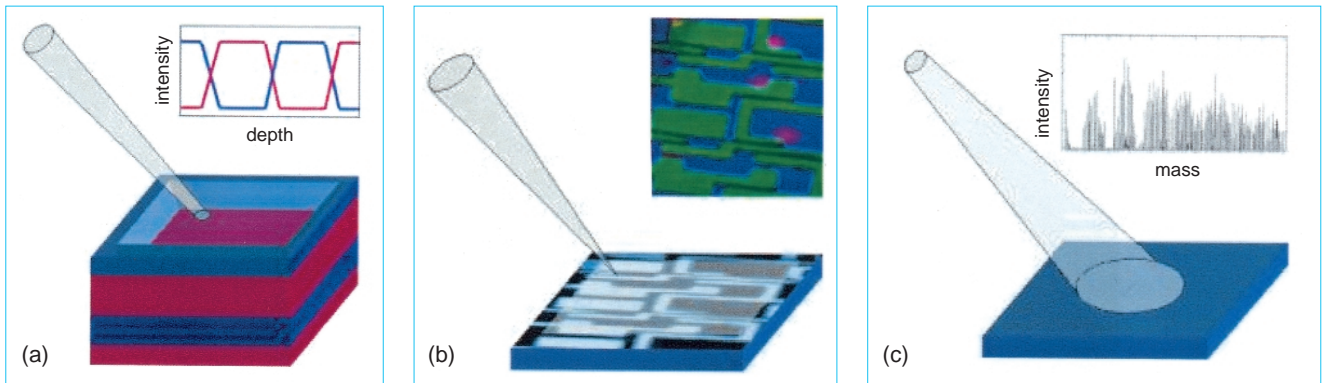


圖 2. (a) 縱深分析, (b) 表面影像分析, (c) 表面質譜分析。

### 3. 分析方式

TOF-SIMS 分析方式分為 (a) 縱深分析 (dynamic-SIMS), (b) 表面影像分析 (image-SIMS), (c) 表面質譜分析 (static-SIMS) 三種 (圖 2), 在縱深分析上解析可達 1 nm 以下。表面影像分析解析度與所使用的一次離子束聚焦有關, 以液態金屬離子槍  $^{69}\text{Ga}^+$  為例, 離子束最小可聚焦約 20 nm 大小。另外表面影像解析度也與訊雜比有關, 若能提高訊號強度並降低雜訊, 可提高表面影像對比、提高影像解析度。表面質譜分析是以小於  $1 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$  的一次離子電流分析樣品表面, 用於分析表面單一層原子或分子結構。

### 4. 一次離子源

TOF-SIMS 所用的一次離子源有  $\text{O}_2^+$ 、 $\text{O}^-$ 、 $\text{Cs}^+$ 、 $\text{Ar}^+$ 、 $\text{Ga}^+$ 、 $\text{SF}_5^+$  或  $\text{Xe}^+$ , 一般較常用  $\text{O}_2^+$  進行化學撞濺, 以提高正離子產率進而降低偵測極限。 $\text{Cs}^+$  適用於週期表右側陰電性高的元素, 可提高負

離子產率。 $\text{Ar}^+$  則適用於定性分析, 主要進行物理撞濺, 可反應出樣品表面的化學環境。 $\text{Ga}^+$  液態金屬離子源由於可聚焦到相當小的尺寸, 可提供高側面解析度 ( $< 100 \text{ nm}$ ) 的離子影像。 $\text{SF}_5^+$  離子源可提高高分子二次離子產率, 適用於分析高分子。TOF-SIMS 所使用的離子源最大的不同在於以脈衝方式而非連續式, 離子槍只在分析瞬間時作用, 所以撞濺速度較慢, 適用於  $< 100 \text{ nm}$  的淺層縱深分析, 較不適合做深層的縱深分析。但目前市售儀器將撞濺離子槍與分析離子槍分開 (dual beam)<sup>(2)</sup> (圖 3), 以時間差的方式可提供較快的撞濺速率 (圖 4), 並可提供不錯的縱深分析速度 (表 1)。因 TOF-SIMS 離子源為脈衝式, 適合搭配  $\text{F}_2$  與  $\text{Kr}$  準直雷射, 將撞濺出的中性粒子離子化, 以克服二次離子質譜儀分析時的基質效應。

### 5. 樣品承接器

TOF-SIMS 的冷指 (cold finger) 樣品承接器 (圖

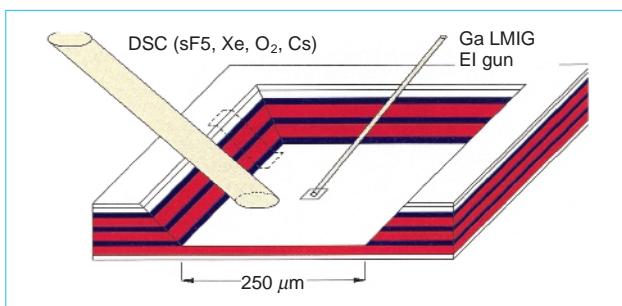


圖 3. 撞濺離子槍與分析離子槍。

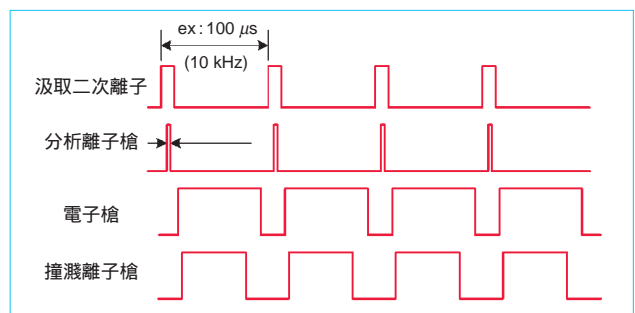


圖 4. 脈衝式 TOF-SIMS 儀器工作時間週期。

撞濺離子槍					
Ion	Sputter angle (same for + and - polarity)	Energy	Beam diameter	Typical total acquisition speed in Si	Depth per data point (5s)
SF <sub>5</sub> <sup>+</sup>	45°	600 eV	50 μm	30 nm/hr	0.04 nm
Xe <sup>+</sup> , Cs <sup>+</sup> , O <sub>2</sub> <sup>+</sup> , ...	45°	1 keV	50 μm	100 nm/hr	0.14 nm
	45°	3 keV	50 μm	400 nm/hr	0.55 nm
分析離子槍					
Ion	Energy	Pulse length	Ions/pulse	Beam diameter	
Ar <sup>+</sup>	11 keV	600 ps	300 - 2000	10 - 25 μm	
Ga <sup>+</sup>	10 - 27 keV	0.5 - 100 ns	8 - 1000	0.1 - 10 μm	

表 1.  
撞濺離子槍與分析離子槍參數。

5) 可分析低沸點化合物和冷凍生物組織樣品，接觸樣品的銅片利用液態氮降溫，使溫度可控制到 -150 °C，並具有程式升溫的功能，可控制每分鐘升溫 0.7 °C，加熱到 600 °C，可做程式升溫二次離子質譜分析 TP-SIMS (temperate-programming SIMS) (圖 6)，研究表面吸附作用隨溫度之變化。

## 6. 飛行時間質譜儀

飛行時間質譜儀是在 1946 年由 Stephens 首次提出，證實不同質荷比的離子被電極汲取出並加速後獲得相同動能，在高真空無電場漂移管中具有不同的飛行速度，可由到達偵檢器的時間區別不同荷

質比的離子，飛行時間公式如下

$$\frac{mv^2}{2} = zeV \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2zeV}{m}}$$

$$t = \frac{D}{v} = D \sqrt{\frac{m}{2zeV}}$$

其中  $v$  為離子速度、 $m$  為離子質量、 $z$  為離子電荷數、 $e$  為電子的電荷、 $V$  為加速電位、 $D$  為飛行距離、 $t$  為飛行時間。

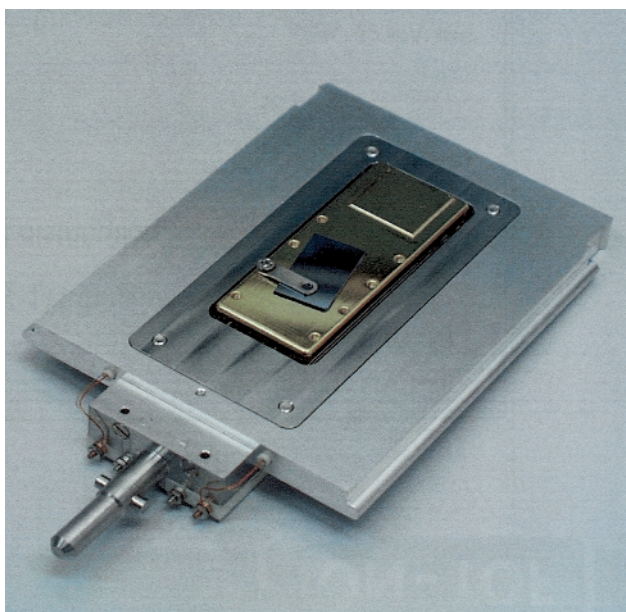


圖 5. 冷指 (cold finger) 樣品承接器。

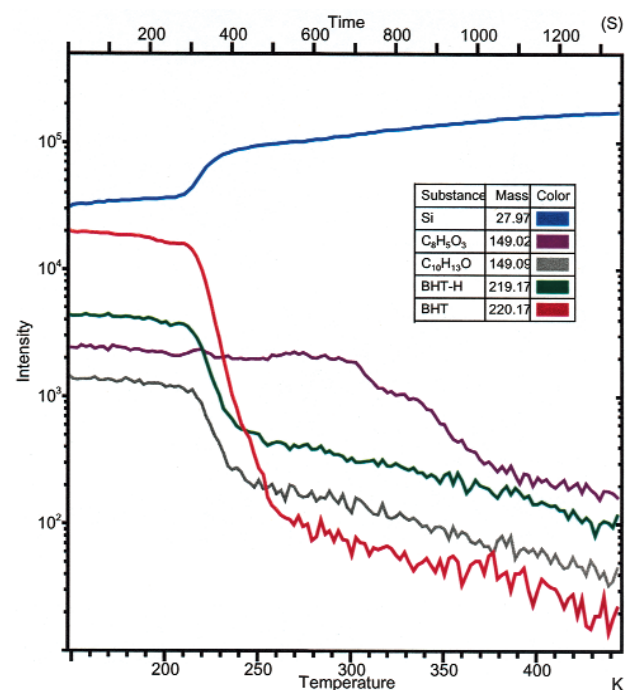


圖 6. 升溫二次離子分析圖 TP-SIMS，有機物 BHT 吸附於 Si 表面隨溫度變化。

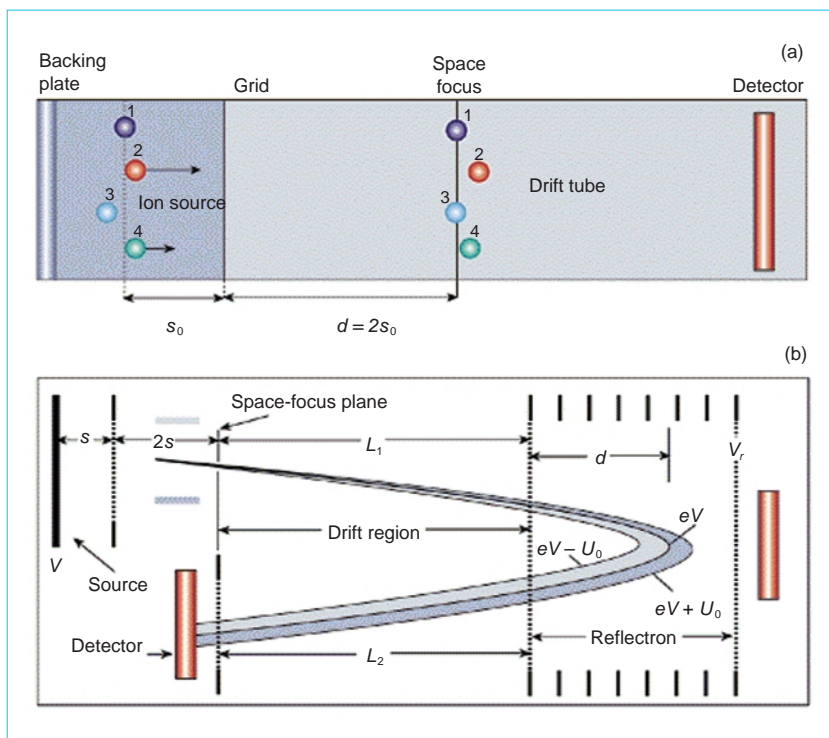


圖 7. 反射式飛行時間質譜儀<sup>(3)</sup>。

但早期飛行時間質譜儀因質量解析度差 (< 5)，實際應用價值低。一直到 1955 年由 Wiley 和 McLaren 設計出具有商業價值的飛行時間質譜儀，質量解析度可達 500。但在接下來 20 年，由於解析度無法提高、無快速準確的計時器，加上需複雜的電子設備，不如四極柱質譜儀使用上普及。一直到 80 年代飛行時間質譜儀才又逐漸受到重視。

造成飛行時間質譜儀質量解析度無法提高的原因有二：(1) 相同質荷比離子具有不同的初始速度，(2) 離子形成的空間分布不同。分別可用時間延遲聚焦 (time-lag focusing) 與空間聚焦 (space-focusing) 的方式改善，但兩者間無法兼得，因此限制了飛行時間質譜儀的應用。

飛行時間質譜儀重新獲得重視的原因有四，說明如下。

(1) 反射式飛行時間質譜儀 (圖 7) 的發明。1973 年 Mamyrin 等人成功的在不影響空間聚焦下，使相同質荷比但初始速度不同的離子能同時抵達偵檢器。其結構如圖 7(b)，在傳統直線型 (圖 7(a)) 飛行時間質譜儀的末端加上施加電位的離子反射鏡 (ion mirror)，離子以一傾斜角度入射，具有較高初始速度的離子入射深度較深，飛行

路徑延長，所需飛行時間增加，可使相同質荷比、不同初始速度的離子同時抵達偵檢器，具能量聚焦的功用，進而提高質量解析度。

- (2) 1970 年代 MCP (microchannel plate detector) (圖 8) 的發明。MCP 具大的偵測面積 (直徑約數公分)、快速的應答時間 (sub-nanosecond)、高的放大倍率 ( $10^3 - 10^6$ )，成為飛行時間質譜儀最常用的偵檢器。
- (3) 電子儀器與電腦的快速發展。可同時記錄所分析質量範圍內的離子，並提高對時間的解析能力，使飛行時間質譜儀的優點完全發揮。
- (4) 生命科技材料分析的需求。生命科技方面的研究在近年來越來越受重視，但其他市售質譜儀質量上限約在 1000 amu 以下，飛行時間式質譜儀可分析質量數萬到數十萬的的分子，能提供生命科學家相當有用的資訊。

### 三、TOF-SIMS 應用

#### 1. 半導體工業上的應用

隨著新進製程技術的研發與元件尺寸的縮小，對超淺層佈植<sup>(5)</sup> (shallow junction implant) (圖 9) 與

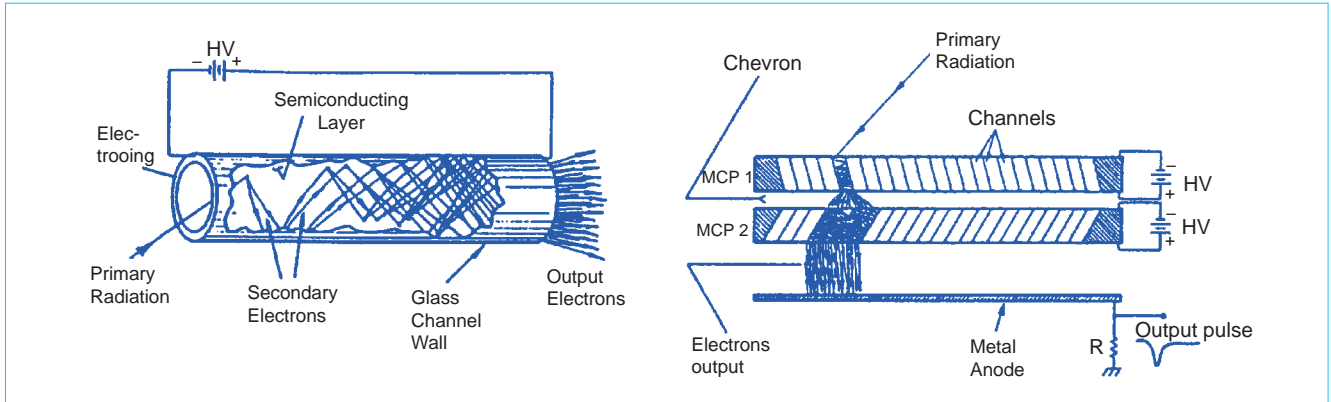


圖 8. MCP (microchannel plate detector)<sup>(4)</sup>。

氧化閘極 (gate oxides) (圖 10) 分析能力的需求越來越嚴格，TOF-SIMS 可提供足夠的分析能力，以達到下一代製程的分析需求。

## 2. 有機分子污染分析

目前半導體廠在不同製程的連接上，仍使用人工運輸的方式，將樣品保存於塑膠製的晶片儲存盒中。由於儲存盒並非完全密閉，大氣中有機污染物，來自牆壁、天花板、油漆、接著劑、作業人員、有機溶劑甚至儲存盒本身，都會造成有機污染物吸附在晶圓上，使得製程良率降低，影響元件的

效能。尤其是目前線寬朝 100 nm 以下邁進，愈凸顯有機污染問題的嚴重性。TOF-SIMS 在有機物的偵測上，提供此問題的解決方案。TOF-SIMS 可直接對樣品表面進行分析，對污染物做定性分析，進而判定有機污染的來源。圖 11 為矽晶圓邊緣遭晶圓儲存盒製造時的高分子添加物污染的測定。

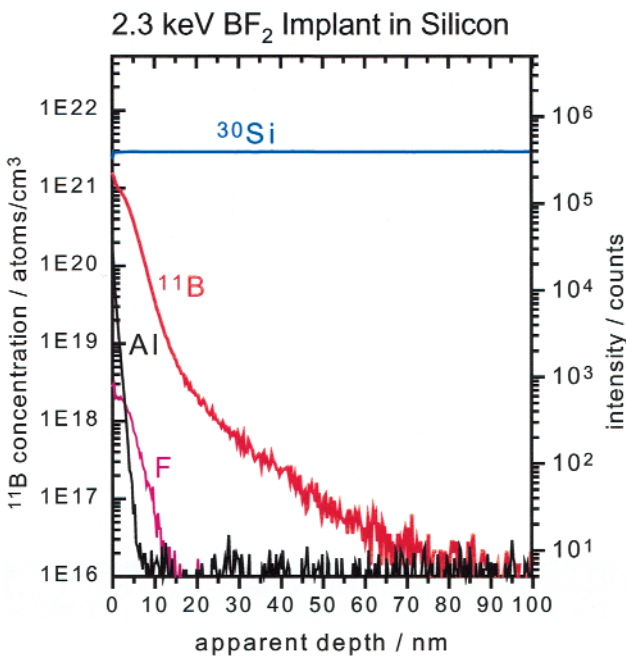


圖 9. 2.3 keV BF<sub>2</sub> implant 縱深分析。

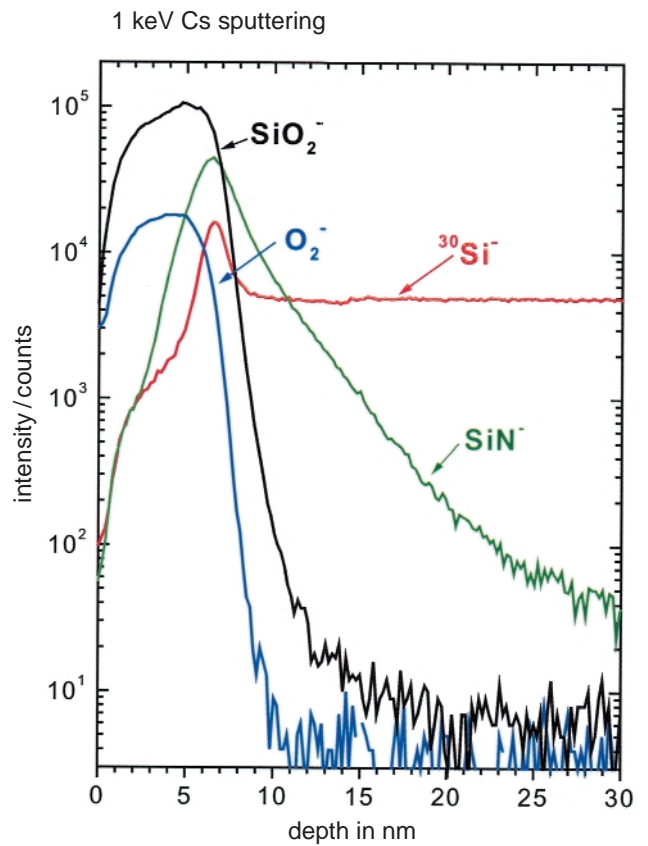


圖 10. 氧化閘極縱深分析。

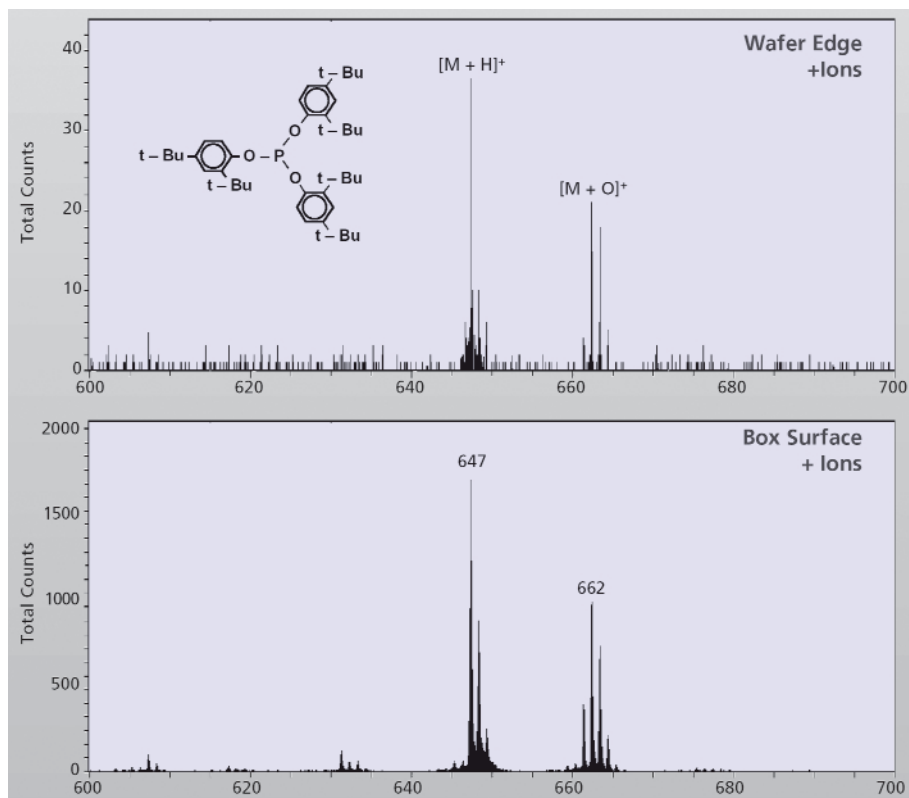


圖 11. 遭污染矽晶圓表面分析質譜，上為矽晶圓邊緣，下為儲存盒表面。

### 3. 揮發性有機物分析

在製程中常使用揮發性有機溶劑進行清洗的步驟，常有殘留的問題發生，影響元件的效能。目前常用的分析方法為熱脫附氣相層析質譜儀，TOF-SIMS 在樣品承接器設計上，具有液態氮降溫 ( $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 與加溫的功能，使揮發性有機化合物冷凝在晶圓上，在低溫狀態下送入 TOF-SIMS 中分析。圖 12 為清潔劑 BHT (butyl-hydroxyl-toluene) 在  $-93\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的質譜圖

### 4. 殘留銅分析

TOF-SIMS 可用來評估不同 CMP (化學機械研磨) 製程對銅導線間介電層殘留銅的去除效率，TOF-SIMS 可做離子影像分析與線掃描分析。圖 13 為寬  $10\text{ }\mu\text{m}$  銅導線與  $10\text{ }\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$ ，可得知 wafer 1  $\text{SiO}_2$  上銅殘留的濃度較 wafer 2 高，可用以評估不同製程的清洗效率。

### 5. 高分子聚合物分析

傳統分析高分子聚合物使用膠滲透層析儀

(GPC)，或核磁共振波譜儀 (NMR) 方法，分析高分子聚合物的質量分布。相較於這些方法，TOF-SIMS 提供快速且容易取得的資訊，包括質量分布及骨架結構。圖 14 為工業界中重要的聚合物聚苯乙烯 (polystyrene, PS)，與 GPC 的方法相較之下 TOF-SIMS 可得準確質量分布圖，由質譜圖中可得

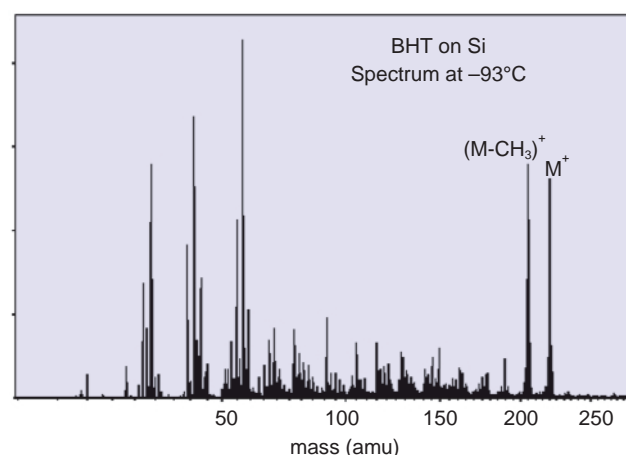


圖 12. 以低溫冷凝方法分析矽晶圓表面揮發性有機物 BHT。

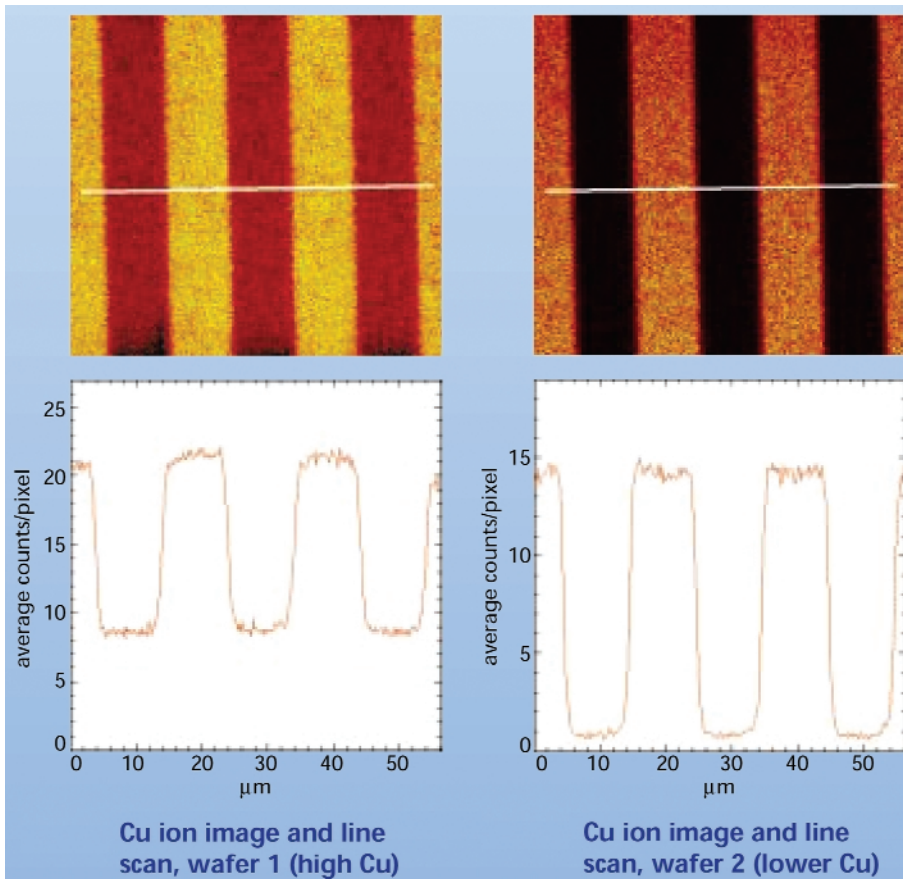


圖 13. 殘留銅表面影像分析。

到三個不同質量分布區，作法是將樣品塗佈極薄一層（約數單分子層）在銀基質上，中性高分子在被

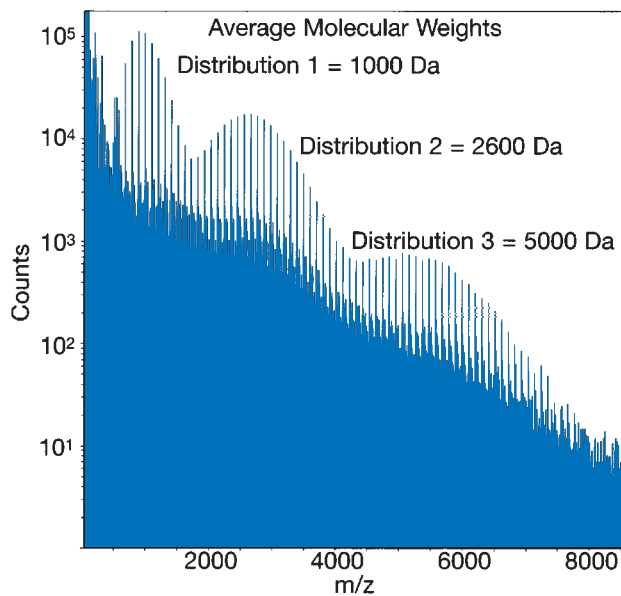


圖 14. 聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 質量分布圖。

一次離子撞濺出後，會與  $Ag^+$  結合形成正離子，增加高分子離子的訊號強度 (圖 15)。

## 6. 生命科技上的應用

掃描式電子顯微鏡廣泛使用於觀察生物組織樣品，但僅能提供樣品表面形貌的資訊。TOF-SIMS

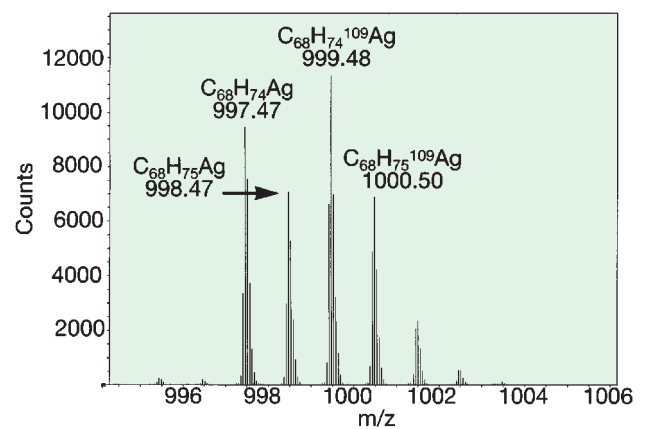


圖 15. 表面銀基質與高分子鍵結以提高離子產率。



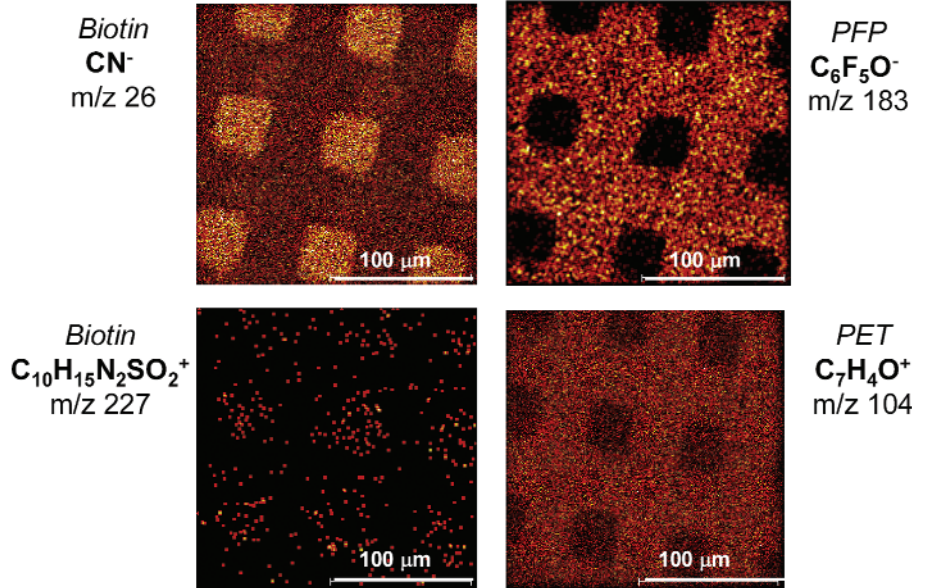


圖 16. 生化分子 Biotin 與高分子材料 PET 表面離子影像分析。

離子影像可提供生物組織化學相關資訊，可補足電子顯微鏡的不足。如何避免樣品化學成分的資訊，不會在製備樣品的過程受到影響，是目前研究的主題之一。目前使用的方法，以冷凍脆裂法 (freeze-fracture)<sup>(6)</sup> 將細胞固定於基材上，可對單一細胞進行分析<sup>(7)</sup>；另外 TOF-SIMS 也應用在研究生化分子如去氧核糖核酸 (DNA)、蛋白質 (protein)、胜 (peptide) 等與高分子材料表面的反應<sup>(8)</sup> (圖 16)，以研發生物晶片 (bio-chip)。

### 7. 醫藥技術上的應用

TOF-SIMS 可提供局部區域的特定分子資訊，在臨床醫學上可用來做藥物釋放控制方面的研究<sup>(9)</sup>。目前醫學界在使用藥物時，希望能在特定環境與時間下，以既定速率釋放有效成分，且減少副作用的發生。目前作法是將藥物外圍包覆一層或多層特殊高分子膜，如圖 17 所示，以控制有效成分的釋放。這些高分子膜通常具有專利以防止仿造，需對其特性加以鑑定。目前多使用光譜的方法，如拉曼光譜或紅外光譜的方法，但受限於側面解析度，僅能對化學成分進行鑑定。TOF-SIMS 可對局部藥物剖面鑑定化學成分與劑量，提供相當有用的資訊。圖 18 左上為藥丸總離子剖面圖 (800 × 800 μm)，下半部為將區域縮小 (250 × 250 μm) 並選特定區域的質譜圖，綠色區域為外層高分子

(ethylcellulose)，對應右上 TOF-SIMS 質譜圖，右下質譜圖為粉紅色區域，質量數 365 amu 位置為內層填充物 (lactose)，質量數 589 amu 為類固醇藥物，可提供成分鑑定與空間分布研究。

### 8. 環境分析上的應用

環境中 2.5 μm 的固態懸浮粒子 (PM<sub>2.5</sub>) 對人體健康有很大的危害，因在其表面的金屬及有機化合物吸入人體後會對 DNA 造成干擾，提高致癌與致突變的風險。TOF-SIMS 具有高的影像解析度，可對粒子分析。圖 19 為以 PTFE 濾紙收集 2.5 μm 粒徑的懸浮固體<sup>(10)</sup>。從影像圖知粒子 1 的粒徑為 2.5 μm，含 Na、Mg、Al、Si、K、Ca；粒子 2 的粒徑為 2.0 μm，與粒子 1 組成相似；粒子 3 主要成分為 Fe，不含其他金屬。另外可由表面質譜圖，判定粒子上吸附的有機物如表 2。

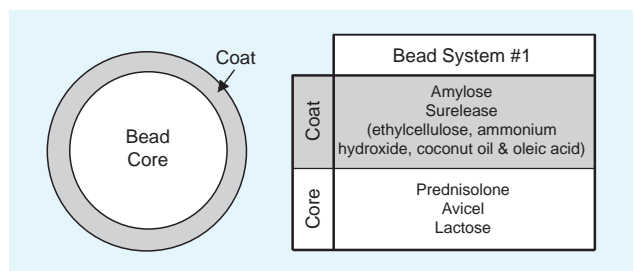


圖 17. 藥丸剖面示意圖。

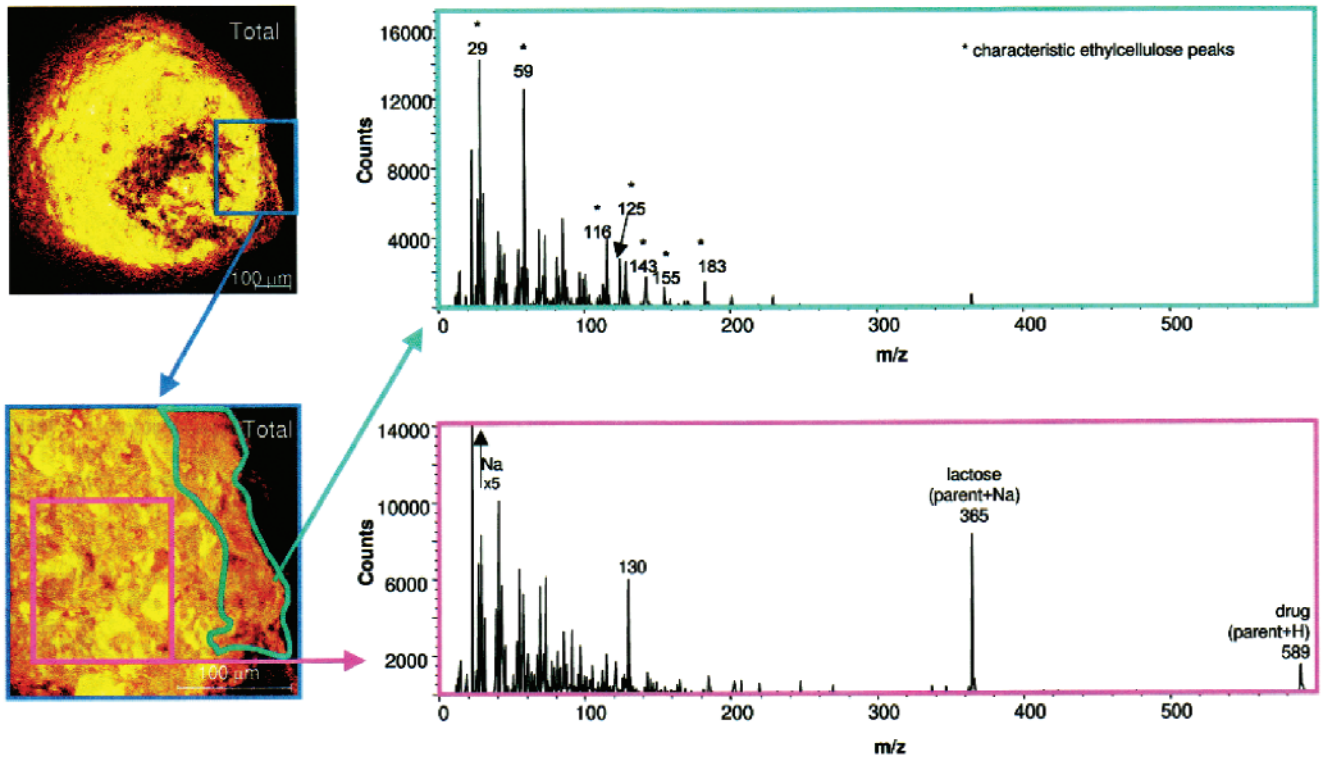


圖 18. 藥丸特定區域表面質譜圖。

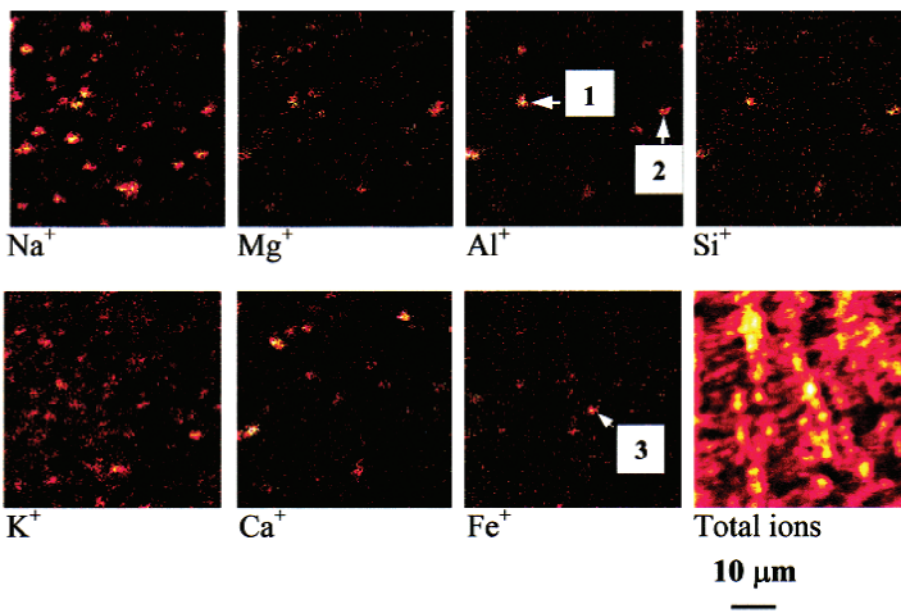


圖 19. PM<sub>2.5</sub> 固態微粒表面金屬離子組成。

### 9. 奈米科技上的應用

TOF-SIMS 具有對表面單一層分子極高的靈敏度，在研究奈米薄膜上可提供相當有用的資訊。目前在製備奈米薄膜常以自組分子單膜 (self-assembly

monolayers, SAMs) 的方式成長，是在金表面接上硫醇 (thiol)，再修飾一種或數種官能基，以改變表面的性質，或接上生化分子以製成生醫晶片，藉由 TOF-SIMS 表面質譜分析的能力，可由表面質譜圖

表 2. TOF-SIMS 測得之粒子表面上的有機化合物。

Mass (measd)	Mass (theory)	Positive ion	Common name of possible compounds
66.0480	66.0469	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	cyclopentadiene
78.0475	78.0470	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	benzene
92.0621	92.0625	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	toluene
104.0638	104.0626	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	styrene
116.0624	116.0626	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub>	indene
128.0623	128.0626	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	naphthalene, azulene
178.0651	178.0783	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	anthracene, phenanthrene, tolan
192.0937	192.0939	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub>	methylphenanthrene
194.0763	194.0732	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> O	anthranol, anthrone, diphenylketene
196.0601	096.0524	C <sub>13</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	xanthone
202.0599	202.0630	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	2-naphthoxyacetic acid, spizofurone
206.1047	206.1095	C <sub>16</sub> H <sub>14</sub>	distyryl
208.0918	208.0889	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub> O	chalcone
234.1105	234.1045	C <sub>17</sub> H <sub>14</sub> O	dibenzalacetone
247.0663	247.0633	C <sub>16</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub> (also possibly C <sub>5</sub> OF <sub>9</sub> , C <sub>10</sub> O <sub>2</sub> F <sub>5</sub> )	1-nitropyrene
257.0911	257.0347	C <sub>14</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>4</sub>	benzoylpas, diphenylamine-2,2'-dicarboxylic acid
275.0609	275.0582	C <sub>17</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub> (also possibly C <sub>6</sub> O <sub>2</sub> F <sub>9</sub> )	3-nitrobenzanthrone
276.0922	276.0938	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	indenopyrene

得到單一分子層的組成資訊<sup>(11)</sup>。圖 20 為具有丙硫醇 (propanethiol) 副鍊的聚雙甲基矽氧烷 (poly (dimethylsiloxane), PDMS) 共聚物以 SAMs 的方式接到金表面上的 TOF-SIMS 表面質譜圖<sup>(12)</sup>，可提供奈米薄膜定性及定量上的資訊。

#### 四、市售商業化儀器

目前市售 TOF-SIMS 有德國的 ION-TOF 生產的 TOF-SIMS IV (圖 21) 與美國 Physical Electronics (PHI) 生產的 TRIFT III (圖 22)。兩者最大的不同在飛行時間質譜儀，PHI 採用其專利設計，以 270° 排列的三個靜電能量分析儀，與常見反射式飛行時間質譜儀都具有很高的質量解析能力。為配合半導體製程及時分析的需求，TOF-SIMS 都設計有 8 吋及 12 吋晶圓樣品腔 (圖 23)，可直接分析整片晶圓，提供製程線上即時監測。

#### 五、結語

國際間近年來廣泛應用飛行時間二次離子質譜儀於各個研究領域上，提供許多相當有用的資訊，

尤其是對新興的生命科技和奈米科技的研究助益，方興未艾。國內目前尚無此儀器，清華大學貴儀中心在國科會和清華大學的補助，預計於 2003 年中完成 ION-TOF TOF-SIMS VI 的試機，期望該儀器在引進國內後，與現有之 Cameca IMF-4f 扇型磁場式的功能互補，協助相關研究領域的創新突破。

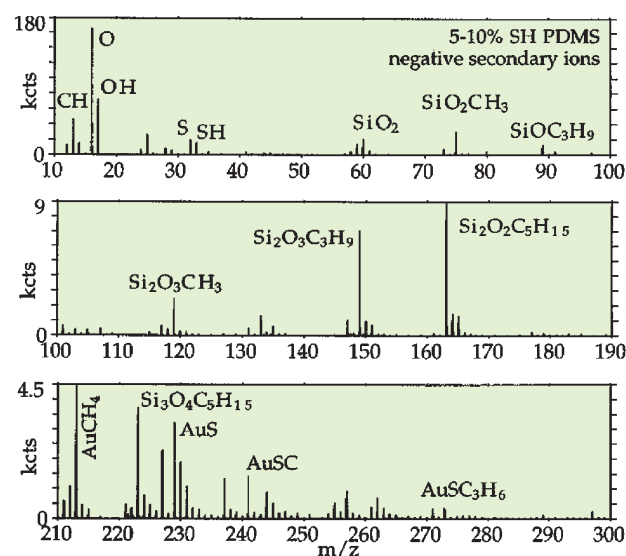


圖 20. PDMS 自組分子薄膜 SAMs 的 TOF-SIMS 表面質譜圖。

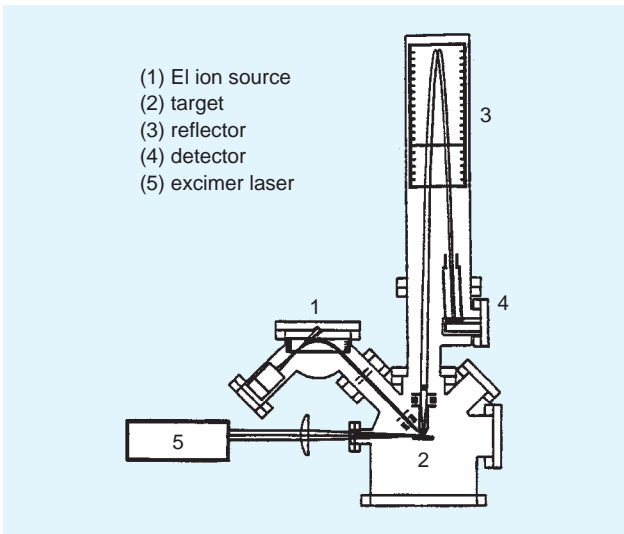
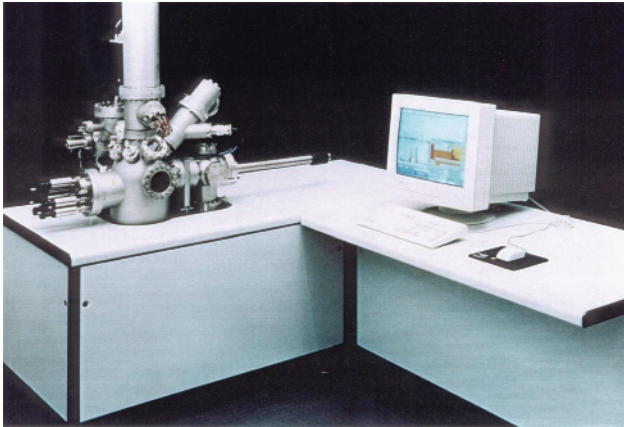


圖 21. ION-TOF 公司 TOF-SIMS VI。

### 誌謝

感謝德國 ION-TOF 公司與美國 PHI 公司提供 TOF-SIMS 相關資料與部分圖片。國科會和清華大學補助經費，購置 TOF-SIMS，特此致謝。

### 參考文獻

1. 凌永健, 中國材料科學學會材料科學叢書 2, 材料分析, 383 (1998).
2. E. Niehuis, T. Grehl, in *Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS XII*, A Benninghoven, P. Bertrand, H. -N. Migeon, and H. W. Werner, ed., New York: Elsevier, 49 (1999).
3. R. J. Cotter, *Anal. Chem.*, 445A (1999).
4. J. L. Wiza, *Nucl. Instr. and Meth.*, **162**, 587 (1979).
5. S. Corcoran, P. Zimmerman, in *Secondary Ion Mass Spe-*

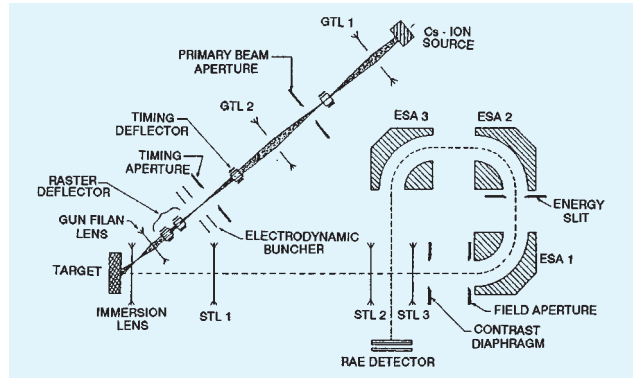


圖 22. Physical Electronics 公司 TRIFT-III。

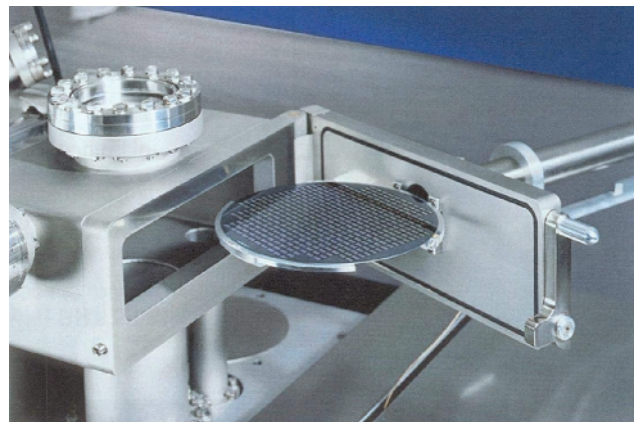


圖 23. 8 吋晶圓樣品腔。

6. T. P. Roddy and D. M. Cannon, *Anal. Chem.*, **74**, 4011 (2002).
7. T. L. Colliver and C. Brummel, *Anal. Chem.*, **69**, 2225 (1997).
8. A. M. Belu and Z. Yang, *Anal. Chem.*, **73**, 143 (2001).
9. A. M. Davies and M. C. Newton, *Anal. Chem.*, **72**, 5625 (2000).
10. Y. -J. Zhu and N. Olson, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3113 (2001).
11. D. J. Graham and B. D. Ratner, *Langmuir*, **18**, 5861 (2002).
12. M. -W Tsao and K. -H. Pfeifer, *Macromolecular.*, **30**, 5913 (1997).

---

陳清源先生為國立清華大學原科系碩士，現就讀於國立清華大學化學系博士班。

麥富德先生為國立清華大學化學系博士，現任奈膜科技副總經理。

凌永健先生為美國佛羅里達州立大學化學博士，現任國立清華大學化學系教授。

Ching-Yuan Chen is a Ph.D. candidate in chemistry at National Tsing Hua University.

Fu-Der Mai received his Ph.D. in chemistry from National Tsing Hua University. He is currently the vice president of the NanoFilm Technology Corporation.

Yong-Chien Ling received his Ph.D. in chemistry from Florida State University, USA. He is currently a professor of chemistry at National Tsing Hua University.