

真空幫浦抽氣性能檢測技術於半導體及光電產業之應用

The Application of Vacuum Pump Performance Evaluation in Semiconductor and Electro-Optic Industries

謝汎鈞、林炳宏、呂日清

Fan-Chun Hsieh, Ping-Hung Lin, Jih-Ching Lu

真空幫浦為近年來半導體及光電產業在製程上之主要設備，由於潔淨環境的要求，使得真空幫浦的應用朝向乾式真空幫浦為主，以滿足半導體光電產業之需求。因沉積製程中會伴隨著污染物存在，促使真空幫浦抽氣性能檢測技術更顯得重要，以減少污染物及抽氣時間。本文從真空幫浦抽氣原理開始，介紹性能檢測技術及分析方法。

Vacuum pumps have been widely used in semiconductor and electro-optic industries. Dry vacuum pumps become the main stream of the first stage of the vacuum pumping for applications in clean room demand and semiconductor electro-optic requirement. The vacuum pump performance evaluation is a critical issue for the high-tech industries. The well-performance pumps can reduce containments, shorten pump-down time, and increase the process efficiency. This paper starts from the principle of vacuum pumps and introduces the performance evaluation technologies and analysis methods.

一、前言

真空幫浦的作用是將一特定空間之氣體分子抽除而達到某一壓力狀態。對於不同製程之應用來說，其工作壓力範圍有所不同，在選擇真空幫浦類型時，須根據製程特性及真空度之需求來選擇所需之真空幫浦以達到抽氣之目的。

隨著未來石油能源的逐漸短缺，人們對替代能源的需求更為增加，例如太陽光、風力、潮汐、地熱等，其中部分替代能源由於受到環境的

限制，僅在某些特定區域才能發電，故藉由太陽光所產生的光子轉換成電力是比較可行的方式。目前太陽光發電在薄膜式太陽電池的趨勢，以銅銦鎘硒 (copper indium gallium diselenide, CIGS) 薄膜太陽電池為熱門研究議題，其製程多採用濺鍍 (sputtering) 方式來鍍製主動層，而濺鍍需在真空之環境來達成鍍膜，其屬於物理氣相沉積 (physical vapor deposition, PVD) 鍍膜之分支，在 PVD 製程會有水氣、氧氣、碳氫化合物等污染物產生，這些污染物會使鍍製之薄膜存在缺陷及增加抽氣時間，

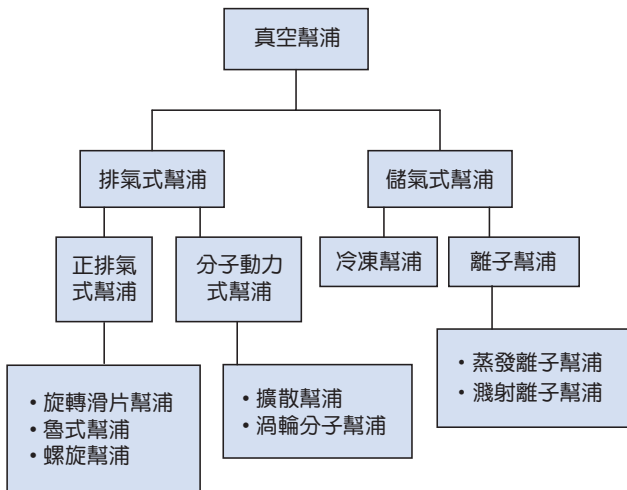


圖 1. 常用真空幫浦分類。

而有效的抽氣及氣體純化對製程而言相形變得重要，因此，真空幫浦在製程中扮演極重要的角色。

真空幫浦在使用上之性能評估項目有抽氣速率、終極壓力、最大抽氣量、壓縮比等，而這些項目中主要的性能參數為終極壓力和抽氣速率。對半導體和光電產業而言，低噪音、低振動亦是重要考慮之因素。這些因素皆會影響製程能否達到所要求及機台是否正常運轉，因此瞭解真空幫浦抽氣性能，對半導體及光電產業設備發展是一項重要課題。本文從真空幫浦抽氣原理開始，接續介紹真空幫浦抽氣性能檢測技術及分析方法。

二、真空幫浦抽氣原理

真空幫浦依據抽氣原理之不同可分為排氣式與儲氣式兩類幫浦。而排氣式幫浦又可分為正排氣幫浦及動力式幫浦，其常用之分類如圖 1 所示。正排氣幫浦的抽氣原理主要可分為四個行程，首先由進氣機構進行吸氣，接著將氣體傳輸密封，再將氣體進行壓縮後，最後將氣體排出幫浦本體，而達到抽氣的目的。而動力式幫浦主要藉由動量傳輸的觀念，將動量轉移到氣體分子上，最後將氣體分子排至外界，以達到抽真空的目的。

1. 排氣式幫浦

正排氣幫浦大多是作為中低真空系統之主要幫浦，或真空系統之粗抽幫浦 (roughing pump) 和高

真空幫浦之前級幫浦 (foreline pump)，其工作壓力範圍可從一大氣壓至 10^{-3} Torr 左右。在正排氣幫浦中，又有以下幾種型式之幫浦較為常用，茲介紹如下⁽¹⁾。

(1) 旋轉滑片幫浦 (rotary slide-vane pump)：其轉子與靜子為不同心的圓形零件，運轉過程中轉子與旋片之組合達到氣體壓縮及傳輸的作用，而腔室中的油脂不僅可擔任旋片與靜子摩擦的潤滑及散熱作用，亦可在運轉過程中達成密封 (sealing) 的效果。圖 2 為其運轉示意，圖 2(a) 中氣體首先由進氣口被吸入，完成進氣過程。接著由於密封作用，氣體因而被傳輸，此時氣體體積達最大值，且與系統隔絕，如圖 2(b) 所示。當葉片持續轉動，此時氣體被壓縮至排氣口的位置 (圖 2(c))。最後當旋片的位置從原先進氣時 A 的位置轉至 B 的位置時，由於壓力差的原因，此時氣體被排出至外界，此為排氣動作，如圖 2(d) 所示。

(2) 魯式幫浦 (roots pump)：其特徵為一對形如花生

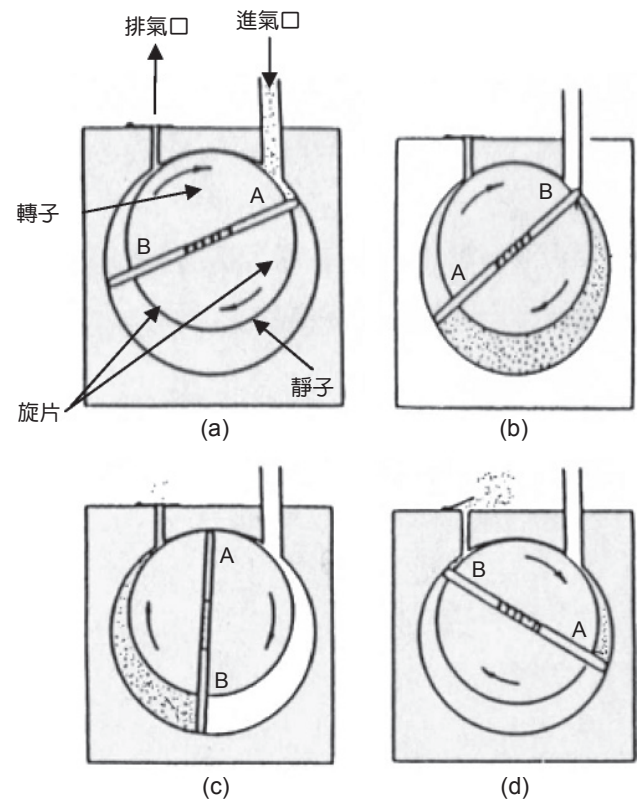


圖 2. 旋轉滑片幫浦運轉示意⁽²⁾，(a) 進氣，(b) 壓縮，(c) 過壓，(d) 排氣。

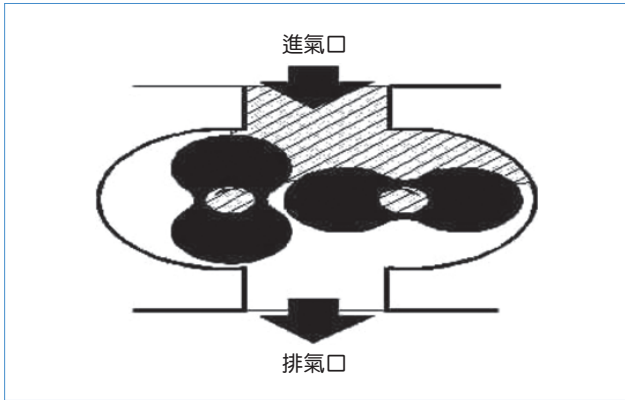


圖 3. 魯式幫浦示意。

米狀的轉子，如圖 3 所示，其轉動是藉由一對定時齒輪 (timing gearing) 驅動使兩轉子維持 1:1 的轉速。而轉子外形設計，同樣是依據 1:1 的齒形設計，使二轉子在操作過程中保持一定間隙。

(3) 螺旋幫浦 (skew pump)：由二個螺牙旋轉方向相反的螺旋狀轉子所組成，其示意可由圖 4 所示，當轉子在運轉時完成進氣、傳輸及排氣的功能。

另外，分子動力式幫浦常用的有擴散幫浦 (diffusion pump) 與渦輪分子幫浦 (turbo molecular pump, TMP) 兩種。

(1) 擴散幫浦：由圖 5 說明當幫浦油 (pump oil) 被

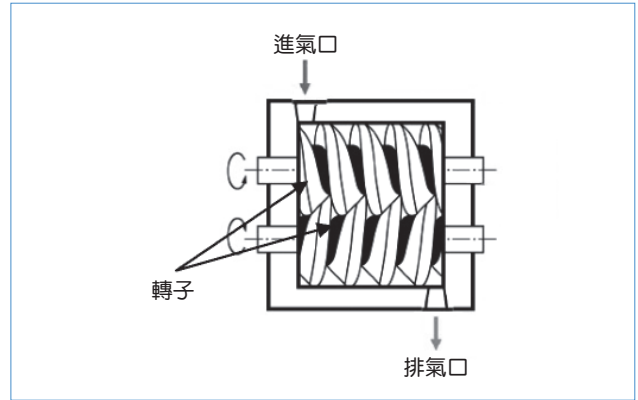


圖 4. 螺旋幫浦示意⁽³⁾。

加熱器 (electric heater) 所加熱後，產生蒸氣分子，接著高速運動之蒸氣分子經由碰撞把動量轉移給待抽氣體，賦予被抽氣體單一方面的動量，並將之排往較高壓力之區域。而幫浦上方真空室之氣體分子被油蒸氣碰撞後，往下移動至較高之壓力區域以達到壓縮作用，亦即抽氣效果，油蒸氣最後到達冷卻之幫浦機體內部並被凝結，且往下流回幫浦油槽。通常此幫浦有 3-4 個壓縮級 (compression stage)，待抽氣體由最頂端一級逐級被壓縮，以至最後由前級之機械幫浦 (backing pump) 抽除。擴散幫浦在使用上須注意油氣回流的問題，可藉由冷凝井 (cold trap) 和擋板 (baffle) 來減少油蒸氣的回流量，

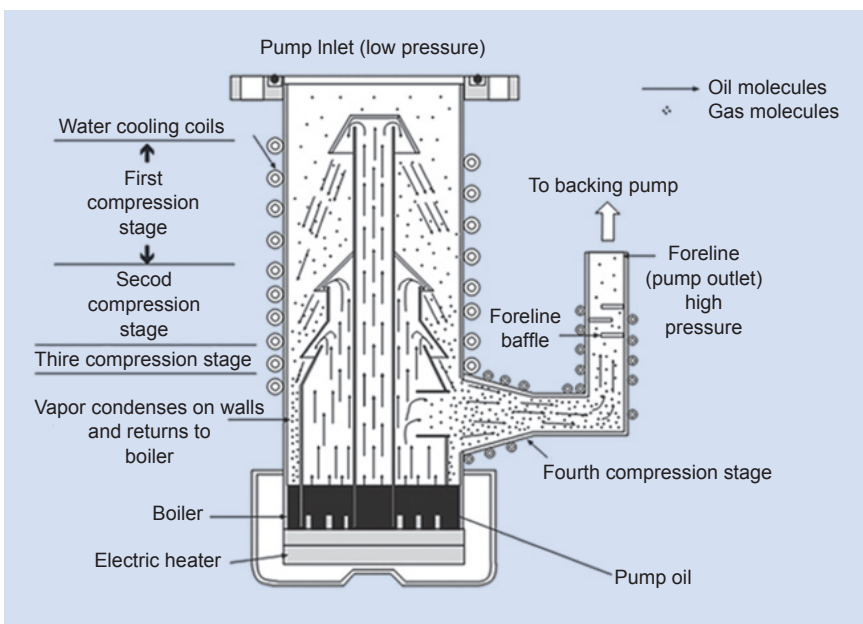


圖 5. 擴散幫浦示意⁽⁴⁾。

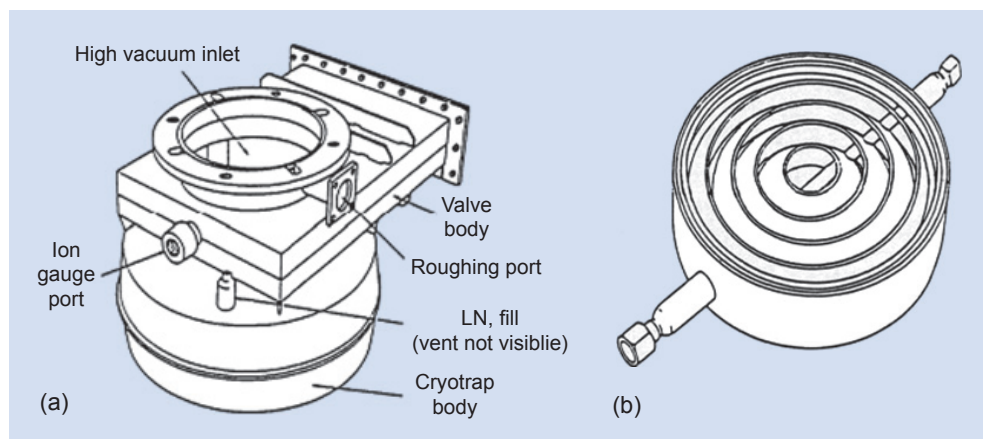


圖 6. 擴散幫浦油氣回收裝置，
(a) 冷凝井，(b) 擋板。

圖 6 為擴散幫浦油氣回收裝置。

- (2) 渦輪分子幫浦：此幫浦抽氣是在分子流情況下，由於氣體分子密度很低，分子間平均自由徑遠大於幫浦之特徵長度。因此氣體分子與壁面碰撞之機率遠高於分子間之碰撞，於是利用高速旋轉之轉子或葉片便能產生抽氣作用，靜子及轉子之特徵如圖 7 所示。幫浦之抽氣效果主要是由高速旋轉之轉子將動量傳遞給氣體分子，亦即利用拖曳作用使其獲得一額外速度分量而朝出口處排出。關於渦輪分子幫浦之發展，有興趣的讀者可進一步參考 M. H. Hablanian 的回顧文章⁽⁵⁾。

2. 儲氣式幫浦

儲氣式幫浦則是將待抽的氣體分子藉由物理或化學吸附的作用，儲存在幫浦內部而達到降低壓力的目的。儲氣式幫浦與排氣式幫浦的不同在於其有抽氣總量的限制，須定期做再生 (regenerate) 的動作。在儲氣式幫浦中常用的有二種：冷凍幫浦 (cryopump) 與離子幫浦 (ion pump)。

- (1) 冷凍幫浦：是利用極低溫的表面來吸附氣體分子，以達到抽氣的效果。在設計上，為防止輻射熱對 2nd stage (array) 的影響，1st stage (array) 要將 2nd stage 完全罩住，且不可透光，同時 1st stage 要有足夠的間隙使氣體能進入 2nd stage，因此 1st stage 通常設計成百葉窗式的 45 度擋片；2nd stage 設計成倒懸片式的杯狀物，杯內部貼有活性碳吸附材料。冷凍幫

浦其抽氣機制主要有二種，首先為低溫冷凝 (cryocondensation)，在抽氣時氣體經由高真空閥而進入幫浦主體，先碰到 80 K 的 1st stage，由於低溫冷凝作用，這時 H_2O 和 CO_2 將失去動能，而被凍結在百葉窗式的 45 度擋片。第二種機制為低溫吸附 (cryosorption)，一些不易被凝結之氣體，如 H_2 、He 及 Ne 等氣體再次失去動能後進入 15 K 的 2nd stage 之內部而被低溫的活性碳吸附住，這種抽氣機制稱為低溫吸附，冷凍幫浦就是靠這兩種作用來達到抽氣目的。冷凍幫浦內部及各級示意如圖 8 所示。

- (2) 離子幫浦：主要是利用電場作用，將被離子化的氣體分子吸出真空腔體，再利用結拖 (getter) 材料將氣體分子化合，進而吸附於腔壁而儲存於幫浦中。而離子幫浦又以以下二種較為常用。
- (i) 蒸發式離子幫浦 (evapor ion pump)：蒸發式離

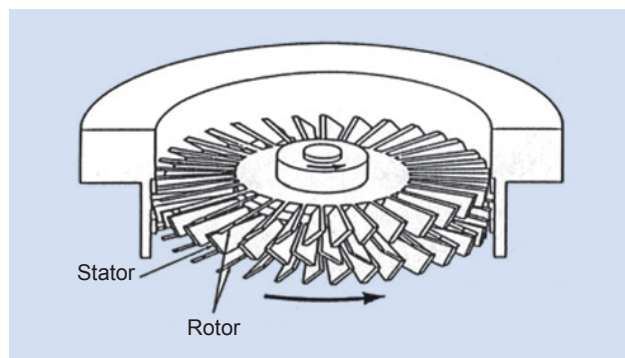


圖 7. 渦輪分子幫浦靜子 (stator) 及轉子 (rotor) 示意。

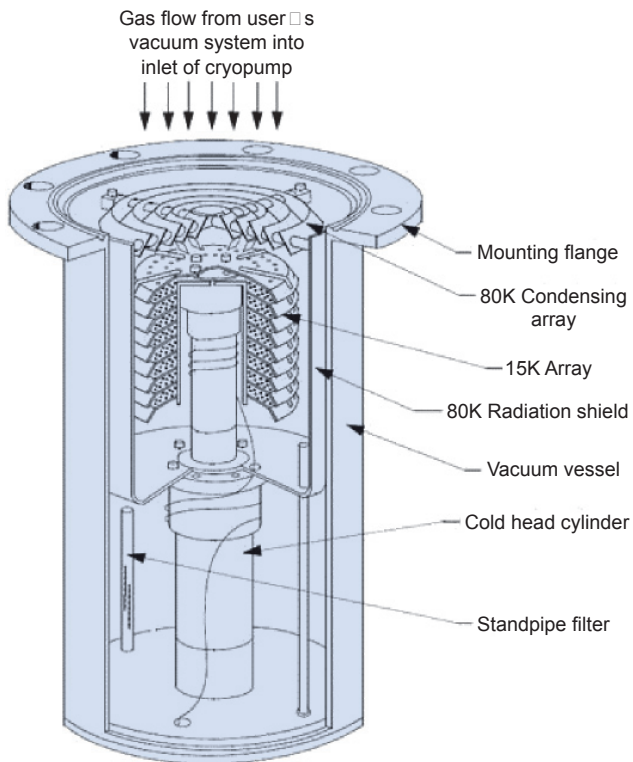


圖 8. 冷凍幫浦內部及各級示意。

子幫浦之抽氣原理與濺射式離子幫浦原理相仿，不同點在於產生結拖作用的鈦原子成因。蒸發式離子幫浦以加熱鈦金屬線及電子轟擊方式使鈦蒸發，進而與真空腔體內之氣體分子及離子進行化學結拖。

- (ii) 濺射式離子幫浦 (sputtering ion pump)：以高速的氣體正離子撞濺陰極鈦板，將鈦原子撞濺出來，再與氣體分子進行化學結拖。

三、真空幫浦抽氣性能檢測技術

目前真空幫浦抽氣性能檢測是以 ISO 21360⁽⁶⁾ 之測試規範為主，其主要為量測真空幫浦抽氣性能所制定之標準，在規範中載明體積流率 (volume flow rate)、終極壓力 (base pressure) 及臨界前級壓力 (critical backing pressure) 之定義。在規範中提到量測體積流率的方法有三種，茲介紹如下。

- (1) 流量計法 (throughput method)：簡單來說就是當測試腔體到達終極壓力後，再通入穩定流量的氣體使腔體維持一平衡壓力。

表 1. 正排氣幫浦之抽氣速率與測試罩之匹配。

每轉排氣容積 (L)	測試罩	
	體積 (L)	直徑 D (mm)
0-0.26	1.3	100
0.26-1.1	5.4	160
1.1-4.2	21	250
4.2-17	84	400
17-65	325	630
65-260	1300	1000

- (2) 孔口法 (orifice method)：主要適合非常小的入口壓力 (高或超高真空) 且較小的氣體通量 (throughput)。
- (3) 定容抽氣法 (pump-down)：較適合自動化生產幫浦量測用。

因為量測氣體通量較為複雜或不容易直接量，所以我們採用流量計法分析真空幫浦抽氣性能，其檢測系統配置示意如圖 9 所示⁽⁶⁾。而由 ISO 1607⁽⁷⁾ 指出正排氣幫浦之抽氣速率與測試罩之匹配如表 1 所示。將每轉排氣容積換算成抽氣速率之單位 (m^3/hr 或 L/s)，即可得知欲測某正排氣幫浦之抽氣速率大小時，應選擇多大的測試罩尺寸。

流量計法為利用流量計調整不同流量 (通量) 使測試腔體 (test dome) 內壓力值為穩定值下，記錄不同流量 (通量) 下之壓力值，而流量 (通量) 與

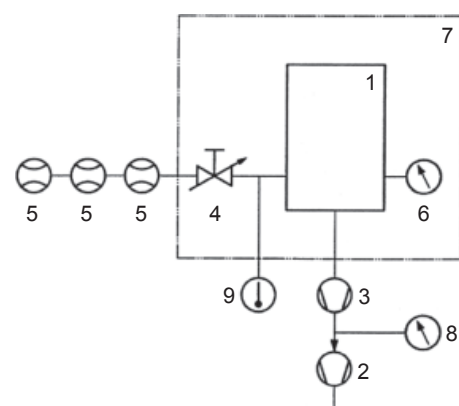


圖 9. 真空幫浦抽氣速率檢測系統配置示意⁽⁶⁾，其中 1 為測試腔體、2 為前級幫浦、3 為待測幫浦、4 為進氣閥、5 為流量計、6 為真空計、7 為加熱套、8 為真空計、9 為溫度計。

進口壓力和終極壓力二者壓力差之比值即為抽氣速率。

四、真空幫浦抽氣性能分析方法

真空幫浦抽氣性能檢測可由 ISO 21360⁽⁶⁾ 之規範得知，本節針對近年來半導體及光電產業所常用之渦輪分子幫浦作相關文獻探討。在實驗上 H. Enosawa 等人採用具有串聯設計之渦輪分子幫浦結構，此結構具有磁浮軸承潤滑之二台同軸且直接接觸之 TMP，如此設計可得到高的壓縮比⁽⁸⁾，對高真空系統來說，此為基本之需求。此外他們也藉由改善幫浦內部及轉子表面之表面粗糙度以抑制逸氣率 (outgassing rate)。K. Ino 等人指出，藉由縮短靜子葉片和轉子葉片之間的距離，以增加紐塞爾數 (Knudsen number, Kn)，如此可維持在高真空下之分子流條件及增加在大流量下之抽氣性能。此外他們也進行了渦輪分子幫浦之不純度量測，此不純度是由於前級幫浦氣體擴散而造成⁽⁹⁾。

在分析上，R. Y. Jou 等人利用計算流體力學 (computational fluid dynamics, CFD) 及直接蒙地卡羅法 (direct simulation Monte Carlo, DSMC)，針對螺旋構槽 (spiral-grooved) 式之渦輪分子幫浦，分析其在不同紐塞爾數下幫浦之抽氣速率和壓縮比，並比較不同前級幫浦條件下渦輪分子幫浦之抽氣速率，計算結果並與實驗量測之結果作比較，最後並指出當 Kn 介於 0.5 到 1 之間時，CFD 和 DSMC 不適合分析此條件下之抽氣速率^(10, 11)。J.-S. Heo 及 Y.-K. Hwang 藉由 DSMC 模擬在分子流 (free-molecular flow) 及過渡流 (transitional flow) 下 TMP 之抽氣性能，並指出在過渡流下最大壓縮比及抽氣速率主要受 Kn 所主導，然而在分子流時則受 Kn 影響不大⁽¹²⁾。F. Sharipov 使用 DSMC 模擬在不同的氣體稀薄程度中，黏滯流 (viscous flow)、過渡流及分子流 TMP 之抽氣速率及壓縮比⁽¹³⁾。他們指出在過渡流和分子流之間，幫浦抽氣特性變化幅度較小，然而在黏滯流則變化較明顯。在黏滯流且高轉子速度時抽氣速率增加，但在較小之轉子速度，抽氣速率反而減小；當接近黏滯流時，壓縮比總是減少。在分析渦輪真空幫浦抽氣速率時，需進一步與

實驗量測結果相比較，以驗證分析模型之建立是否合理。

針對渦輪分子幫浦而言，國研院儀科中心自行建立一套真空幫浦抽氣速率檢測系統，得以發展國內自主性之真空幫浦抽氣性能檢測技術，在此也藉由模擬的方式得到分析之抽氣速率曲線，以與實驗之結果作一比較。首先，圖 10 為實驗抽氣速率曲線圖，其為抽氣速率和入口壓力之結果，由圖可知當壓力在 1.8×10^{-5} 至 4×10^{-4} Torr 壓力範圍下，抽氣速率隨著入口壓力增加而增加，這是由於當壓力差固定時，抽氣速率正比於進氣流量。

此系統除了藉由流量計法測試渦輪分子幫浦抽氣速率外，另外也由圖 11 之分析抽氣速率曲線得知在入口壓力為 4×10^{-4} 到 6×10^{-4} Torr 之間，分析之抽氣速率與實驗所得之抽氣速率結果一致。整體來說渦輪分子幫浦因其抽氣特性的關係，其在分子流 (molecular flow) 抽氣性能為較佳。

五、結論

在半導體光電產業設備發展應用上，真空幫浦在製程使用上需求增加，如何減少製程污染物及減少抽氣時間為預期的挑戰。本論文針對真空幫浦抽氣性能檢測技術，包括真空幫浦抽氣原理、抽氣性能檢測技術及抽氣性能分析方向等作一簡介，並應用於半導體光電產業。

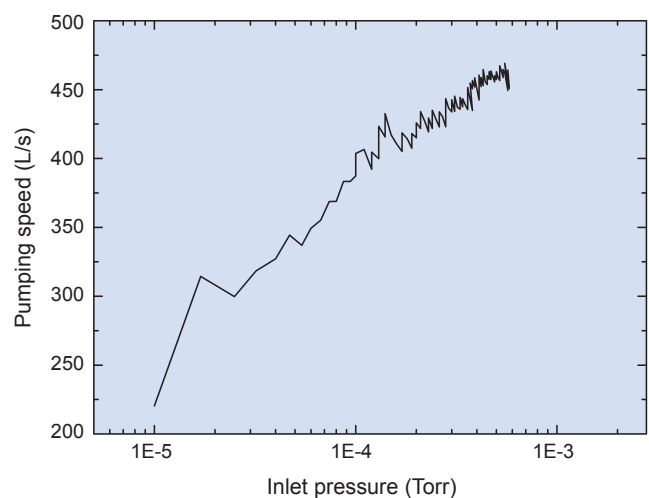


圖 10. 實驗抽氣速率曲線。

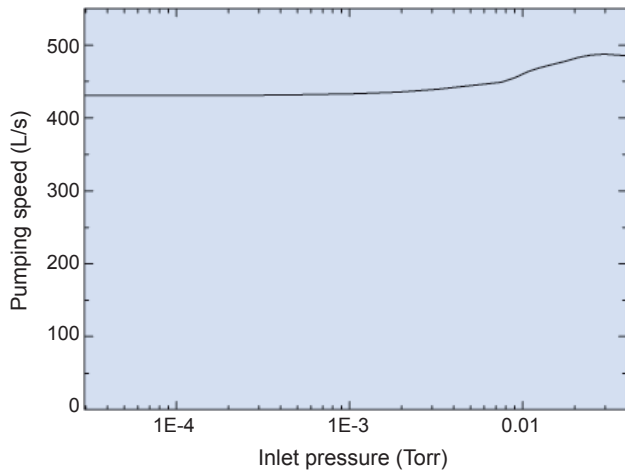


圖 11. 分析抽氣速率曲線。

分析真空幫浦抽氣速率，除了實驗之外，在高真空下，計算上變得相對困難，需借助高速電腦或平行計算，以分析在高真空下之流場行為。

參考文獻

1. 真空技術與應用, 新竹: 國家實驗研究院儀器科技研究中心, 101-178 (2001).
2. 呂登復, 實用真空技術, 國興出版社, 52 (1986)
3. www.pfeiffer-vacuum.com
4. www.svc.org
5. M. H. Hablanian, *Vacuum Science and Technology-Pioneers of the 20th Century*, New York, AIP, 126 (1994).
6. ISO 21360 International Standard (2003).
7. ISO 1607 International Standard (1990).
8. H. Enosawa, C. Urano, T. Kawashima, and M. Yamamoto, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**, 2768, (1990).
9. K. Ino, K. Sekine, T. Shibata, T. Ohmi, and Y. Maejima, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **16**, 2703, (1998).
10. R. Y. Jou, H. P. Cheng, Y. W. Chang, and F. Z. Chen, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **18**, 1016, (2000).

11. R. Y. Jou, S. C. Tzeng, J. H. Liou, *Int. J. Rot. Mach.*, **10**, 1, (2004).
12. J. S. Heo and Y. K. Hwang, *Vacuum*, **56**, 133, (2000).
13. F. Sharipov, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **28**, 1312, (2010).



謝汎鈞先生為國立交通大學機械工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Fan-Chun Hsieh received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



林炳宏先生為中華大學資訊管理碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理工程師。

Ping-Hung Lin received his master in information management from Chung Hua University. He is currently an assistant engineer at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



呂日清先生現任國家實驗研究院儀器科技研究中心資深技術員。

Jih-Ching Lu is currently a senior technical engineer at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.