

電漿和非電漿製程中 *in-situ* 製程監控技術

In-situ Process Monitoring Technologies for Plasma and Non-plasma Processes

志水徹

Toru Shimizu

隨著半導體元件的小型化和製程的複雜化，*in-situ* 製程監控技術變得越來越重要。其中，蝕刻製程中的終點控制技術是最先進製程技術節點的關鍵技術之一。光學發射光譜 (OES) 作為電漿乾蝕刻的監測工具而廣為人知。本文介紹了 OES 技術及其在實際製程中的應用範例。也介紹了不依賴電漿發射光譜，而是在腔體排氣管路中使用副產物測量的最新製程監控技術。

As semiconductor devices become more miniaturized with complicated process flow, *in-situ* process monitor technology is becoming more and more important. Especially, endpoint control technology in etching processes is one of key technologies at the most advanced process nodes. Optical emission spectroscopy (OES) is widely known as a monitoring tool for plasma dry etching. This article describes the OES technology and examples of its applications to actual processes. The latest process monitoring technology that does not rely on plasma emission but uses byproduct measurement in the exhaust line of the chamber is also introduced.

一、前言

在半導體製程中，所需的晶片結構是透過利用沉積、蝕刻和平坦化等技術形成的。在化學氣相沉積 (chemical vapor deposition, CVD) 和原子層沉積 (atomic layer deposition, ALD) 等沉積製程中，精確控制薄膜厚度與薄膜品質至關關鍵。在蝕刻製程中，蝕刻深度及其輪廓的控制對於製程結果具有決定性影響⁽¹⁾。為了正確控管這些屬性，作為製程之眼的製程監控技術變得日益不可或缺。在蝕刻製程中的蝕刻深度控制對於避免過度蝕刻或過少蝕刻至為關鍵。正確蝕刻深度控制是透過適當控制對基層的選擇性和整個晶圓的製程均勻性以及適當控制製程時間來實現的。為了實現合適的製程控制，光學發射光譜 (optical emission spectroscopy, OES) 已廣泛應用於電漿乾蝕刻製程^(2,3)。

先進的半導體元件結構複雜，例如高深寬比 (high aspect ratio) 和異質材料 (heterogeneous material) 的蝕刻，為蝕刻製程帶來了許多挑戰。除了非等向性 (anisotropic) 的反應離子蝕刻 (reactive ion etching, RIE) 之外，不涉及電漿的等向性 (isotropic) 化學乾式蝕刻 (chemical dry etching) 技術也被引入以增強材料去除技術⁽⁴⁾。具有挑戰性的最新先進製程需要適合各種製程 (包括電漿和非電漿乾蝕刻) 的監控技術。HORIBA 多年來一直致力於開發半導體製程的 *in-situ* (即時) 監控技術，為穩定半導體製程的良率做出了貢獻。本文介紹了 *in-situ* 製程監控的最新技術和應用，主要針對蝕刻製程。

二、用於電漿製程的光學發射光譜

光學發射光譜 (OES) 是使用光譜儀 (spectrometer) 分析電漿發射光譜的技術的總稱。電漿過程中激發態 (excited state) 物質 (原子、分子和離子) 發出的光由光譜儀測量。這種電漿發射光譜提供電漿中的物理現象相關的各種資訊，例如電漿中化學物質組成及其變化。

如今，OES 已成為在半導體產業中分析電漿製程的常用技術。OES 最常見的應用之一是蝕刻製程中的終點檢測 (endpoint detection, EPD)。圖 1 解釋了終點檢測的基本原理。蝕刻反應的副產物 (byproduct) 最初來自第一層 (以綠色表示)。如果蝕刻過程到達有不同材料成分的第二層，它會產生不同的化學物質 (以紅色表示)。目標層蝕刻完成 (蝕刻到達下一層) 的點稱為終點 (endpoint)。

例如，如果第一層是 SiO_2 ，第二層是 Si ，並且使用 CF_4 作為蝕刻氣體， SiO_2 和 CF_4 的反應產生 SiF_x 和 CO_x 。蝕刻到達第一層的終點時，這些副產物 SiF_x 和 CO_x 發射光譜的強度會發生變化。這是說監測 SiF_x 和 CO_x 發射光譜使我們能夠了解蝕刻過程何時到達第一層的終點。這種檢測蝕刻過程終點的技術稱為終點檢測。

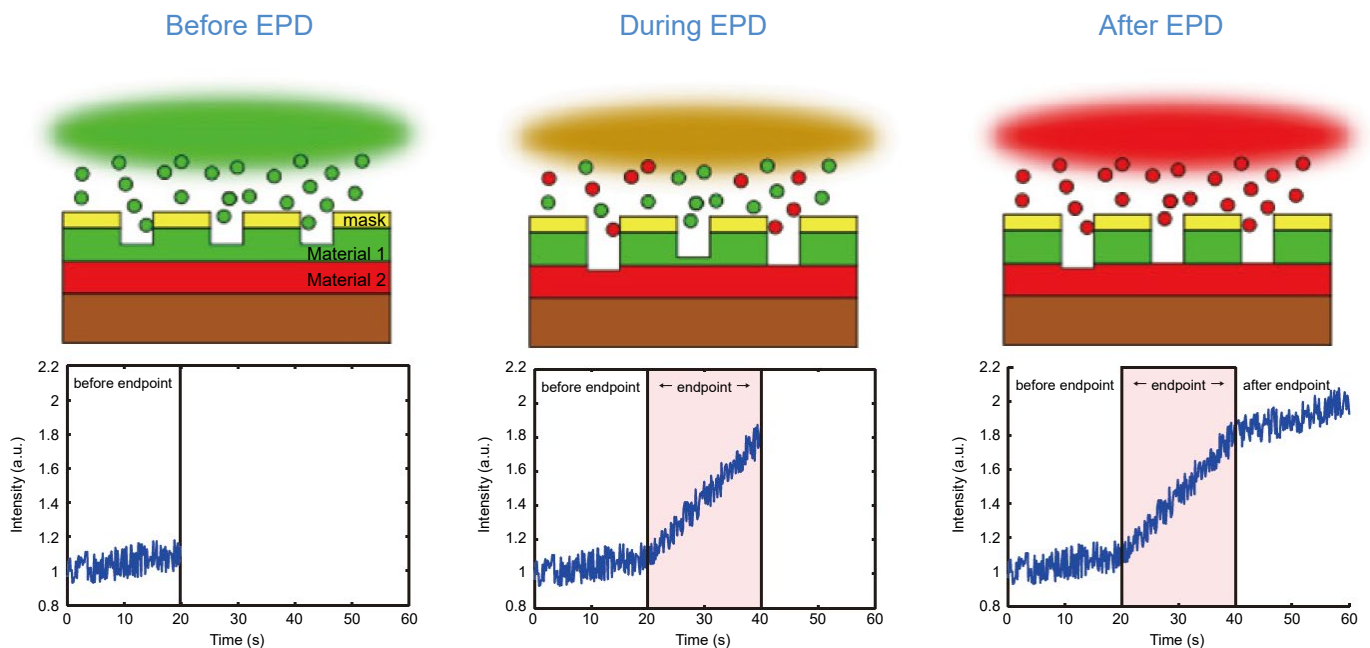


圖 1. 終點檢測的原理⁽³⁾。

三、以 HORIBA 的 OES 解決方案為例

OES 解決方案必須針對待測物和製程要求考量波長範圍 (spectral range) 和波長解析度 (spectral resolution)。圖 2 顯示了 HORIBA 的 OES 設備 EV 2.0。表 1 為 EV 2.0 系列的代表規格；針對不同波長範圍和波長解析度開發了 3 種型號。電漿發射光譜跨越從紫外線到近紅外線的波長範圍。STD 型號設計用於檢測一般 OES 應用的 200–1050 nm 寬波長範圍。如果要將微弱的發射光譜與相鄰波長處存在的不同氣體的發射分開測量，則需要高解析度光譜儀。HR 型號專為此類用途而開發，波長解析度低到 1 nm。此外，對於相對簡單的腔體監測，可以使用性價比優良的 LR 型號。



圖 2. EV 2.0 光譜儀⁽⁵⁾。

表 1. EV 2.0 系列的規格。

	EV 2.0-LR	EV 2.0-STD	EV 2.0-HR
波長範圍	300–900 nm	200–1050 nm	300–800 nm
波長解析度	6.5 nm 以下	2.5 nm 以下	低至 1 nm

EV 2.0 系統配備電腦用於測量控制和數據分析。根據要求，EV 2.0 光譜儀可以配備整合的可程式數據處理功能。客戶可以自行開發和優化光譜數據處理功能。

隨著半導體製程變得更加複雜和小型化，電漿發射光譜的變化也而變得更複雜和微小。為了成功偵測訊號的微弱變化，EV 2.0 配備了一種名為「Rupture algorithm」的複雜演算法。Rupture algorithm 專為可靠且靈敏的終點檢測而設計。在 Rupture algorithm 的處理中，Rupture intensity 是根據訊號斜率的變化計算的，如圖 3 所示。即，當訊號的斜率恆定時，Rupture intensity 顯示較小的值，並且在斜率變化的點處，Rupture intensity 變大。圖 4 顯示了 Rupture algorithm 對訊號雜訊比的顯著改善。

圖 5 顯示了 EV 2.0 在蝕刻應用中的實際結果。這製程的目標是氧化物 (oxide, BPSG) 蝕刻，如圖 5(a) 所示。晶圓的蝕刻開口率 (open ratio) 小於 2%，並且在單一蝕刻步驟期間存在兩種類型的接觸面 (contact)；PAD 和 Floating gate。圖 5(b) 顯示了測量的強度訊號 (紅色) 及其一階微分訊號 (綠色)。一階微分訊號垂直放大，使過程中的變化點更加明顯。透過應用適當的數據處理，處理後的訊號 (綠色) 成功地清楚地偵測到蝕刻到達 PAD 和 Floating gate 時的變化。

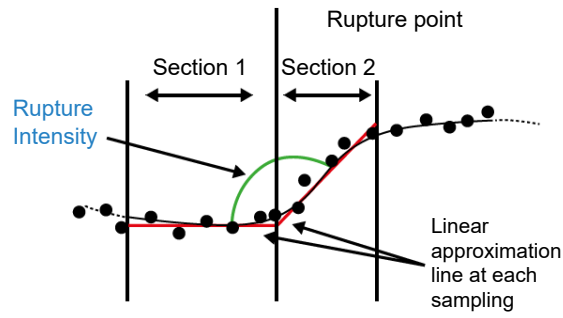


圖 3. Rupture algorithm 原理⁽⁵⁾。

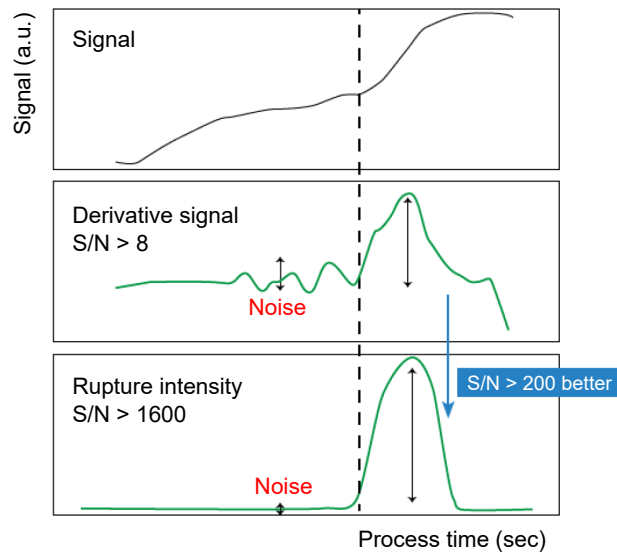


圖 4. 透過 Rupture algorithm 訊號放大⁽⁵⁾。

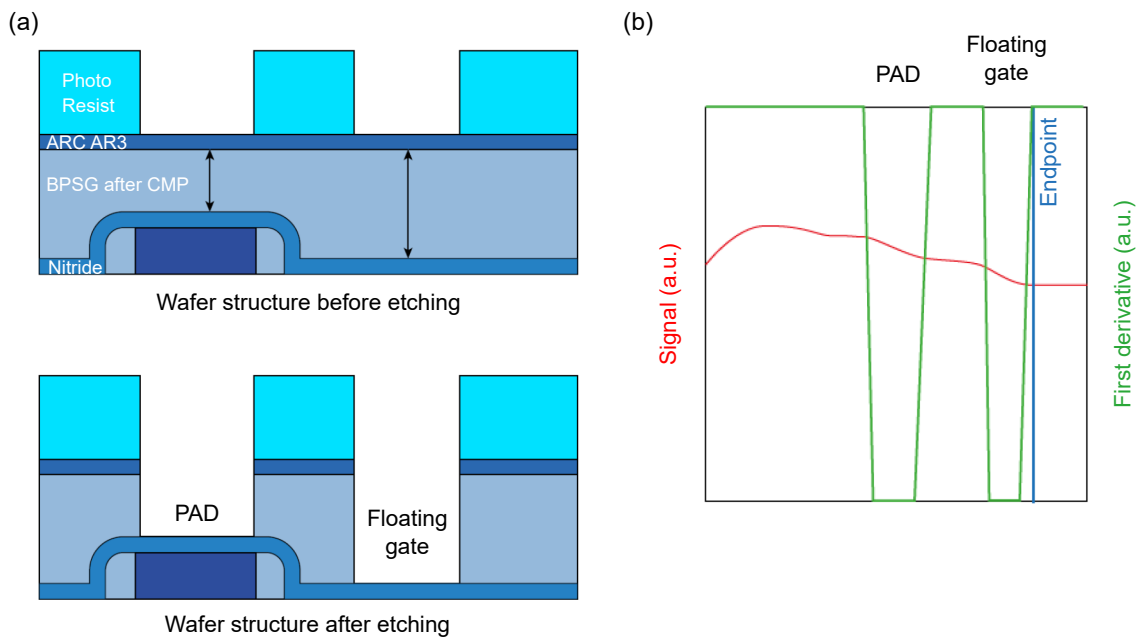


圖 5. OES 應用實例⁽⁵⁾：(a) 晶圓結構；(b) OES 訊號。

四、先進製程的新解決方法：監控副產物以進行製程控制

在先進蝕刻製程中，因為開口面積小且深寬比高，用 OES 的終點檢測已經變得困難。為了克服這個困難，近年來人們嘗試了各種改進，包括數據處理⁽⁶⁾。此外，非電漿 (non-plasma) 化學乾式蝕刻和遠距電漿蝕刻 (remote plasma etching) 開始應用於先進製程，如環繞式閘極 (gate-all-around, GAA) 架構中的 SiGe Recess 和 Release 蝕刻⁽⁷⁾。在非電漿製程中，反應室內沒有電漿的發射光譜，無法使用 OES 進行製程控制。這不僅限於非電漿製程，也適用於遠距電漿蝕刻。如此，無法使用 OES 的製程越來越多了。

為了在這種情況下實現製程控制，HORIBA 開發了基於 IRLAM™ 技術的雷射氣體監測儀 LG-100⁽⁸⁾。該技術利用紅外線吸收 (infrared absorption) 來直接測量流過的分子。在蝕刻製程中，LG-100 透過直接偵測腔體排氣管路中的副產物，提供更清晰的製程腔體中的製程狀態資訊。圖 6 為 LG-100 的外觀及結構示意圖。LG-100 氣室入口和出口配有 NW40 法蘭，可容易安裝到製程設備。

* IRLAM 是在日本和其他國家的 HORIBA 註冊商標或商標

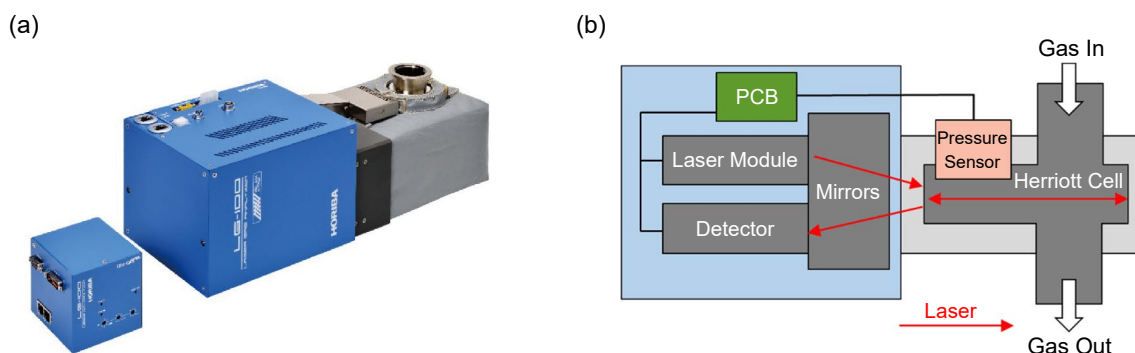


圖 6. 雷射氣體監測儀 LG-100：(a) 外觀照片⁽⁸⁾；(b) 內部結構示意圖。

LG-100 具有一個雷射模組 (QCL：量子串連雷射)，可將紅外線發射到整合式氣室 (Herriott cell) 中。氣室中的反射光由紅外線偵測器檢測到。雷射的波長需與目標分子的吸收相對應。

在吸收光譜學 (absorption spectroscopy) 中，比爾-朗伯定律 (Beer-Lambert law) 描述了在氣體濃度和吸收之間的關係。

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon Cl \quad (1)$$

其中 I_0 為入射光的強度， I 為透射光的強度， A 是表示吸收率的指標，稱為吸光度 (absorbance)。吸光度 A 與氣體固有吸收係數 ϵ 、氣體濃度 C 和光路長度 l 成比例關係。

式 (1) 顯示吸光度與光路長度成正比。換句話說，如果能夠增加光路長度，則能夠提高氣體濃度的檢測敏感度 (sensitivity)。Herriott cell 內部具有多重反射結構，透過多次反射延長光路長，實現比傳統吸收光譜法更高敏感度的檢測。LG-100 透過波長設計和 Herriott cell 的效果，可以檢測極低濃度下的目標分子。

五、LG-100 副產物測量應用實例

為了示範 LG-100 在實際蝕刻製程中的能力，LG-100 安裝在感應耦合電漿 (inductively coupled plasma, ICP) 蝕刻設備中，如圖 7 所示。LG-100 位於渦輪分子幫浦 (turbomolecular pump) 和乾式幫浦 (dry pump) 之間。與 OES 不同，LG-100 先需要針對目標氣體專門選擇雷射波長。本實驗選擇 LG-100 的雷射波長來測量 SiF_4 。

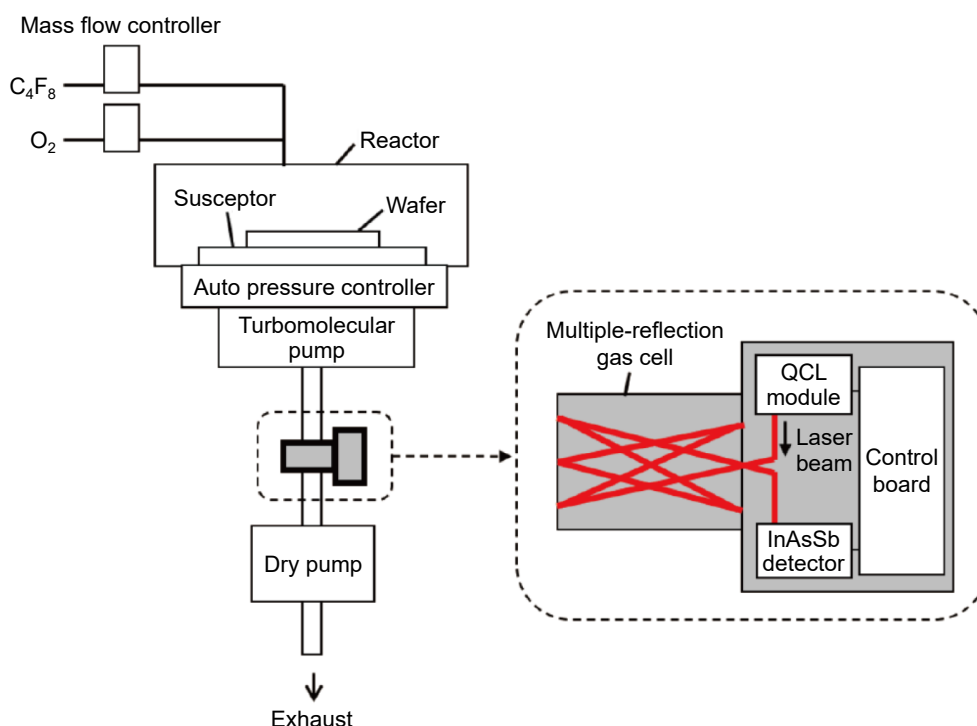


圖 7. LG-100 在蝕刻設備上的實驗裝置示意圖⁽⁸⁾。

我們使用沉積 SiO_2 薄膜的 4 吋矽晶圓進行本次評估。如圖 8 所示，準備了帶有 3 種光罩圖形 (mask pattern) 的樣品。樣品 (a) 是一塊空白晶圓 (100% 開口區域)，沒有任何光罩圖形。樣品 (b) 和 (c) 具有同樣是 5% 的開口率但不同圖形的開口區域。

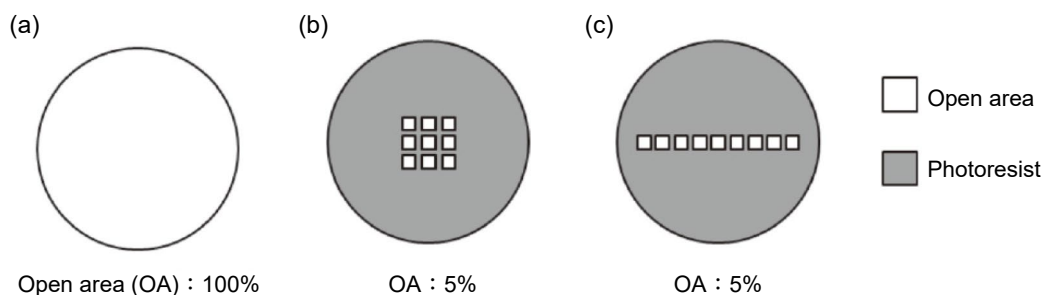


圖 8. SiO_2 樣品的光罩圖形⁽⁸⁾。

使用 30 W 至 180 W 的不同偏壓功率 (bias power) 對具有圖案 (a) 的樣品進行蝕刻 1 分鐘。LG-100 測得的 SiF_4 分壓 (partial pressure) 訊號如圖 9(a) 所示。由圖 9(a) 可見分壓訊號隨著偏壓功率而增加。 SiF_4 分壓訊號 (來自圖 9(a)) 和 SiO_2 蝕刻速率 (etch rate) 之間的關係如在圖 9(b) 所示。蝕刻速率是根據製程後使用橢圓偏光儀 (ellipsometer) 測量的 SiO_2 厚度計算的。圖 9(b) 顯示相關性非常高， R^2 超過 0.999。此相關結果表明可以根據 LG-100 測量的 SiF_4 分壓即時估計蝕刻速率。

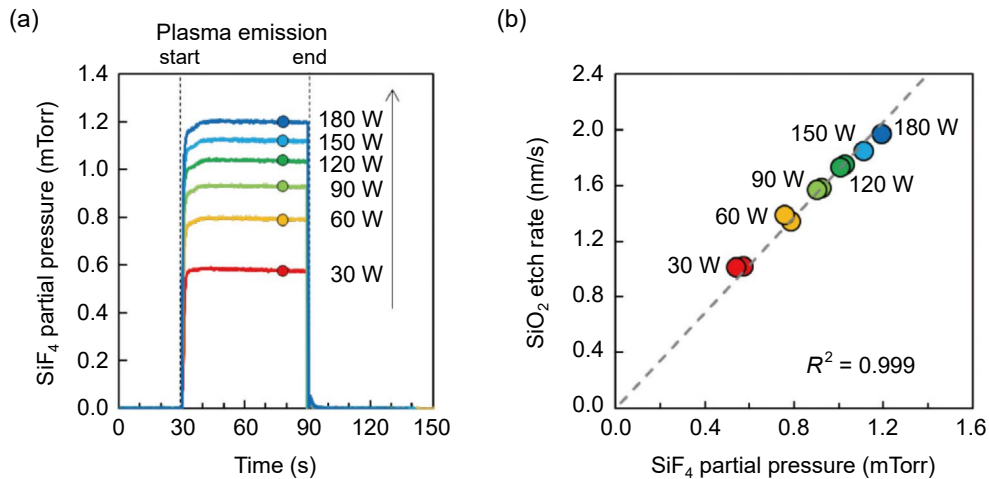


圖 9. 不同偏壓功率下的 SiF_4 分壓訊號⁽⁸⁾：(a) SiF_4 分壓訊號趨勢；(b) SiF_4 分壓與 SiO_2 蝕刻速率之間的相關。

樣品 (b) 和 (c) 的 SiO_2 蝕刻時的 SiF_4 訊號如圖 10 所示。圖 10 中的訊號 (a) 和 (b) 對應於圖 8 中的樣品 (b) 和 (c)，在大約 220 秒後顯示出非常明顯的 SiF_4 分壓訊號變化。因為 Si (SiO_2 的下層) 的蝕刻速率比 SiO_2 較高， SiO_2 蝕刻接近終點時 SiF_4 分壓訊號增加了。

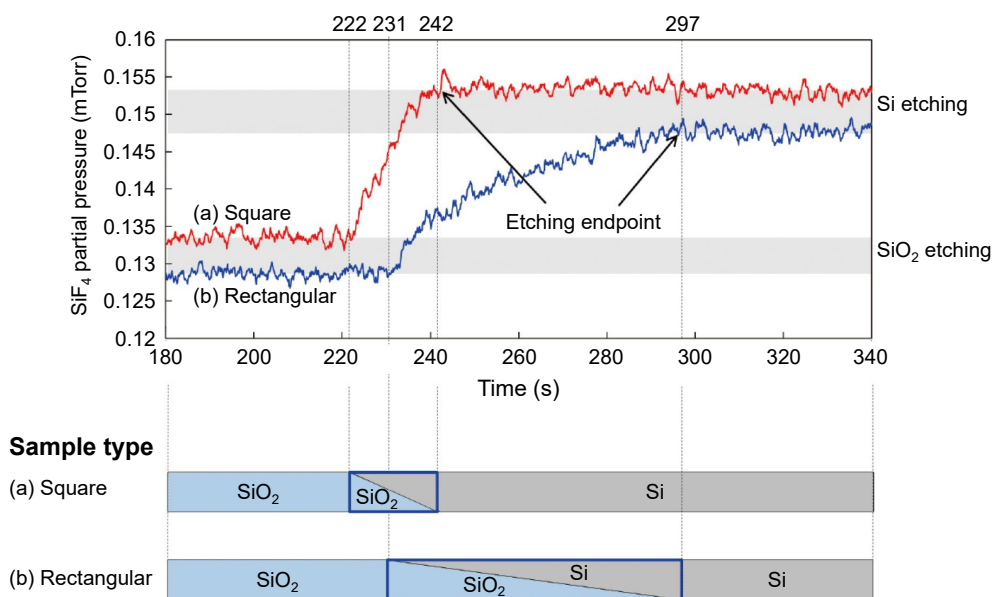


圖 10. 終點時間對應於不同光罩圖形 SiF_4 分壓訊號⁽⁸⁾。

蝕刻到達終點時，圖 10 中的訊號 (a) 和 (b) 顯示不同的變化斜率。在這個製程中，晶圓的中心和邊緣有不同的蝕刻速率。所以樣品 (c) 比樣品 (b) 因為開口區域差異而有不同的蝕刻速率的開口。結果，終點附近的訊號 (b) 斜率比訊號 (a) 成小。這表明，透過 LG-100 的 SiF₄ 訊號趨勢，可以了解不同光罩圖形（儘管具有相同的開口率）引起的蝕刻速率非均勻性。

六、結論

HORIBA 開發了適用於電漿和非電漿製程的 *in-situ* 製程監控解決方案。表 2 總結了 OES 和 IRLAM (紅外線吸收) 技術的特點。

OES 可以透過一台光譜儀分析各種化學物質，是了解電漿腔體狀態的非常有力且通用的工具。另一方面，儘管目標化學品有限，IRLAM 技術的副產物測量對於蝕刻製程的終點檢測有重大的潛力，尤其是應用於非電漿製程來說是一個非常強大的解決方案。

本文主要介紹了這些技術的蝕刻終點的應用。然而，OES 和 IRLAM 的應用並不限於該領域。這些技術提供電漿和非電漿製程的各種資訊，並有助於半導體的研究開發和生產能力，包括新製程配方、品質和生產良率。

表 2. OES 與 IRLAM (紅外線吸收) 技術對比表。

	OES	IRLAM (紅外線吸收)
原理	發射光譜	紅外線吸收
應用製程	電漿製程	電漿和非電漿製程
偵測對象	電漿狀態	反應副產物
偵測物質	原子，分子，離子	分子 (紅外活性)
多種氣體分析	可能	需要針對氣體選擇雷射波長

參考文獻

1. H.-M. Park, D. S. Grimard, J. W. Grizzle, and F. L. Terry, Jr., “Etch Profile Control of High-Aspect Ratio Deep Submicrometer α -Si Gate Etch,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **14**, 242 (2001).
2. D. H. Kim, J. E. Choi, and S. J. Hong, “Analysis of optical emission spectroscopy data during silicon etching in SF₆/O₂/Ar plasma,” *Plasma Science and Technology*, **23**, 125501 (2021).
3. E. Bluem, J-P Vassilakis, M Thiercelin, M Aubé, H Birk, *HORIBA Readout*, **39**, 130 (2012).
4. H. Ohtake, N. Miyoshi, K. Shinoda, S. Fujisaki, and Y. Yamaguchi, *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SG0801 (2023).
5. “Optical Emission Spectroscopy Sensors Endpoint Detection Solutions”, please refer to the website: https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Semiconductor/Brochures/EV_Series.pdf
6. S.-J. Oh, D.-Y. Sung, J.-M. Ko, and S. K. Nam, “Improving detection of plasma etching end point using light compensation on optical emission spectra,” *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **40** (5), 052206 (2022).
7. N. Loubet, S. Kal, C. Alix, S. Pancharatnam, H. Zhou, C. Durfee et al., “A Novel Dry Selective Etch of SiGe for the Enablement of High Performance Logic Stacked Gate-All-Around NanoSheet Devices,” *2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, December 07-11, 11.4.1 (2019).
8. Y. Sakaguchi and M. Hada, *HORIBA Readout*, **58**, 76 (2024).

作者簡介

志水徹先生為日本京都工藝纖維大學電子資訊工程碩士，現為台灣堀場股份有限公司資深工程師。Toru Shimizu received his M.S. in the Department of Electronics and Information Technology from Kyoto Institute of Technology, Japan. He is currently a Senior Engineer at HORIBA Taiwan, Inc.