

IRLAM技術を用いた半導体エッチングプロセス向け レーザーガス分析計の開発

Development of a Laser Gas Analyzer for Semiconductor Etching Process using IRLAM Technology

坂口 有平

SAKAGUCHI Yuhei

波田 美耶子

HADA Miyako

半導体製造プロセスでは、ドライエッチング技術を用いてnmオーダーの微細形状の加工が行われている。最先端のエッチングプロセスにおいてプロセス制御を精密に行うため、プロセスの状態をリアルタイムにセンシングする技術は重要である。HORIBAでは量子カスケードレーザー (QCL) を用いた赤外レーザー吸収変調法 (IRLAM) を開発しており、高感度で高速に測定できる特徴を生かして半導体エッチングプロセスに適用可能なガス分析計の開発を行った。本稿では分析計の構成や実際のエッチングプロセスで評価した事例について紹介する。

In the semiconductor manufacturing process, dry etching technology is utilized for making nm-order microstructures. Sensing technologies for real-time process monitoring is important for precise process control in advanced etching processes. HORIBA has developed an infrared laser absorption modulation (IRLAM) using a quantum cascade laser (QCL). Taking advantage of IRLAM's high sensitivity and fast response performance, we have developed a gas analyzer which optimized for etching processes. In this paper, we introduce the configuration of the analyzer and evaluation results of actual etching process.

はじめに

近年の半導体デバイスは高集積化し、3次元的で複雑な微細構造をとるように発展してきており^[1]、加工時に制御しなければならぬ寸法精度も厳しいものとなってきた。最小加工寸法が数nm以下の回路を形成するためには、原子にすると数個や数十個のレベルでの加工の制御が必要とされており、トランジスタのゲート電極やコンタクトホールの形成などにおいては、nmオーダーの微細形状を加工できるドライエッチング技術が用いられている^[2]。

エッチングプロセス中の加工状態を管理しリアルタイムに制御を行うため、プラズマエッチングの量産設備では発光分光分析が実用化されている。HORIBAはプラズマ発光分光分析技術を保有しており、その技術を用いた発光分光装置は生産現場だけでなくプロセス開発から生産管理までの様々な段階で幅広く活用されている^[3]。一方で、最先端のエッチングプロセスの中には、開口率やアスペクト比などの条件によっては十分な信号が得られないケースや、ケミカルドライエッチングのようにそもそもエッチングにプラズマ源を使用しないため発光分光が適用できないケースもでてきており、そのような先進的なプロセスにも対応できるセンシング技術が求められている。

HORIBAの持つ分析技術の一つである赤外分光法は古くから自動車、科学、環境、半導体などの様々な産業分野に適用されてきた。フーリエ変換赤外分光法 (FTIR) は、光源として高温にした発熱体を用い、そこから放射される幅広い波長帯の赤外光を、干渉計を通して干渉波として取り出し、フーリエ変換することで発光波長全域にわたるスペクトルを得る分析法である。また、非分散型赤外分光法 (NDIR) と呼ばれる手法は、光源からの一部の波長の光を目的に合わせて光学フィルタで取り出し、その光の変化を測定する手法であり、FTIRよりシンプルな構成で小型の分析計を実現できる^[4]。

FTIRやNDIRの技術を用いたガス分析計は半世紀以上の歴史があり、プロセス監視・制御用として確立された技術であるが、半導体プロセスのアプリケーションに適用するには、検出感度や応答速度の点でさらなる技術的な挑戦が必要である。HORIBAで新たに開発したガス分析手法である赤外レーザー吸収変調法 (IRLAM) は、量子カスケードレーザー (QCL) から発生する光をガスセルで多重反射させ、検出した信号にHORIBA独自の演算アルゴリズムを組み合わせることで、高い検出感度で高速測定が可能な分析技術である。我々はこのIRLAMの技術を用いて半導体のエッチングプロセスのアプリケーションに最適なガス分析

計の開発を進めてきた。本稿では、IRLAMの原理と半導体プロセス向けに開発した分析計の詳細について述べた後、実際のエッチングプロセスでの評価結果から得られた本分析計の有効性について述べる。

IRLAMの原理と構成

ガス分子はそれぞれ構造に応じた固有のエネルギー準位を持ち、光と相互作用した際に特定の波長の光を吸収する。光が物質によって吸収される際の入射光と透過光の関係はランバート・ベールの法則として知られている。

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon Cl$$

入射光を I_0 、透過光の光の強さを I とすると、一定の厚さ l の試料の中を光が通過する際に光の強度は対数的に減少し、吸光度 A は、濃度 C と、そのガスの持つ吸光係数 ε に比例する。IRLAMを始め、NDIRやFTIRにおいても吸収分光による定量は、この原理に基づいている。

IRLAMでは光源として中赤外領域の光を発振できるQCLを使用している。QCLは半導体薄膜を積層させた構造を持ち、それにより形成される半導体量子井戸のサブバンド間の光学遷移を利用して中赤外波長のレーザー光を発振、放

射する。HORIBAでは、このQCLを自社で設計・製造する技術を確認しており、測定対象ガスに応じた最適なQCLを準備することが可能である。

QCLから放射される光は直進性のよいレーザー光であり、この光をガスセルに入射させ、ガスセル内に配置された2枚のミラー間で光を多重反射させることにより光路長を長くとることが可能である。ランバート・ベールの法則で示されるように、試料中を光が通過する距離が長いほど大きな吸光度が得られるため測定感度を向上することができる。HORIBAのIRLAMではガスセルにヘリオットセルと呼ばれる2枚の凹面ミラーを用いる構成を採用しており、光学設計を工夫することでミラー形状を細長形状とし光路長を確保した上でセル内容積の低減を図れるようにしている。この設計によって感度の向上とガス置換時間の低減が可能となり、サイズの点でも小型化が実現できている。

IRLAMでは独自の演算アルゴリズムとして、測定したガスの吸収信号から「特徴量」を抽出する手法を用いている。具体的な内容は別の文献^[5]にて説明されているため、ここでは詳細には触れないが、この手法により干渉ガスの影響やQCLの発振波長のドリフトの影響、圧力や共存ガスによるスペクトルブロードニングの影響などを補正することが可能となり、また演算は組込み型のマイクロコンピュータで実行できるため、コンパクトな装置構成にすることができる。



Figure 1 Photograph of the laser gas analyzer, LG-100.

IRLAMを用いた半導体向けレーザーガス分析計

Figure 1に今回開発したレーザーガス分析計LG-100シリーズの外観を示す。本製品はセンサユニットと通信変換ボックスで構成され、センサユニットの外形は440(W)x170(D)x150(H) mm、通信変換ボックスは80(W)x92(D)x87(H) mmである。測定成分としては半導体のエッチングプロセスにおける主要な副生成物である SiF_4 をターゲットとしている。

分析計の構造図と光学系の配置図をFigure 2に示す。センサユニットは半導体製造装置の配管への取付の容易さを考慮し、ガスの入口と出口はNW40のフランジとする設計とした。ガスセルは180℃に温調可能であり、内蔵されているヒーターの配置を最適に設計することでコールドスポットになりがちな光学窓の部分も含めて接ガス部分の温度分布が均一になるようにしている。レーザー光源とガスセル、検出器間の光学系についても、使用するミラーの枚数をなるべく減らしたコンパクトな構造とした。

ガスの測定においては、配管内の圧力の情報も重要なパラメータとなる。半導体製造装置における圧力測定には静電容量型の真空計が広く使われており、HORIBAでも自社で静電

容量型の真空計を開発している^[6]。HORIBAの真空計(VGシリーズ)は1 Torrから1000 Torrまでのレンジで最高200℃の温度に対応可能な仕様の製品をラインナップしている。エッチングプロセス中のチャンバー圧力は数mTorrであり、排気ラインの圧力も1 Torr以下の真空となっていることが多い。本分析計では、真空計を自社開発している強みを生かし、ガスセル内に組込めるよう設計した真空計が内蔵されている。

通信仕様については、最近の半導体製造装置では通信のリアルタイム性からEtherCAT[®]の採用が進んでいるため、本分析計もEtherCAT[®]通信に対応可能な仕様となっている。センサユニットと接続される通信変換ボックスはEtherCAT[®]通信及びアナログ入出力のインターフェースを持っており、半導体製造装置へ組み込みしやすくなっている。

性能評価

Table 1 に分析計の主な仕様を示す。分析計の出力は SiF_4 の分圧値となり、そのフルスケールは10 mTorrである。繰り返し性・直線性・ゼロノイズ(3σ)は $\pm 1\%$ F.S.以下の仕様である。

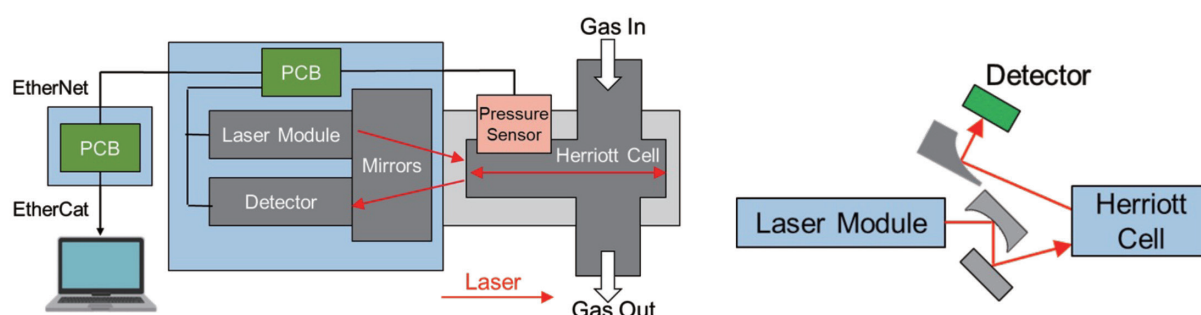


Figure 2 Conceptual diagram of the gas analysis procedure in LG-100.

Table 1 Typical specifications of LG-100.

原理	赤外レーザー吸収変調法
セル温調温度	180℃
測定ガス及びフルスケール	測定ガス： SiF_4 フルスケール：10 mTorr
繰り返し性	$\pm 1\%$ F.S.
直線性	$\pm 1\%$ F.S.
ゼロノイズ	1%F.S.以下 (3σ)
ゼロドリフト	$\pm 1\%$ F.S./8 h
周囲温度範囲	20 to 50℃
圧力センサ測定レンジ	1 Torr
圧力センサ精度	$\pm 1\%$ F.S.
暖機時間	120 min.以上
リークレート	$1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}(\text{He})$ 以下
耐圧	200 kPa (A)

Figure 3は既知濃度の SiF_4 ガスを N_2 で希釈することで20%F.S.刻みで分圧を変え、また0%F.S.と100%F.S.を繰り返して測定した結果を示す。**Figure 4**にはゼロ点のノイズ及び8時間の安定性の評価結果を示す。繰り返し性・直線性は $\pm 1\%$ F.S.以内であり、ノイズについても約0.2%F.S.と良好なS/N比で安定した測定ができることが確認できた。

エッチングアプリケーションへの適用例

今回開発したガス分析計を実際の半導体エッチング装置に取り付け、プロセスでの評価を実施した。**Figure 5**に実験構成を示す。誘電結合プラズマ型のエッチング装置の排気側に設置されているターボ分子ポンプとドライポンプの間の配管に分析計を取付けて排ガス測定を行った。サンプルウエハには4インチのSiウエハ上に SiO_2 を成膜したものを

用い、エッチング時に発生する SiF_4 の変化を測定した。サンプルは**Figure 6**に示すように開口率とマスクパターンが異なる3つのサンプルを準備した。サンプル(a)は SiO_2 面上にマスクがされていない開口率100%のサンプルであり、サンプル(b), (c)は開口率5%になるようにマスクがされたサンプルである。(b), (c)は開口率が同じであるが、マスクパターンが異なっており、(b)はウエハ中心に四角形に開口部が配置され、(c)は直径上に長方形に配置されている。今回の試験におけるエッチング条件は、チャンバー圧力 1.0 Pa, C_4F_8 30 sccm*, O_2 20 sccm*, ICPパワーは500 W, バイアスは30 Wを基準条件として試験を実施した。

*sccm: standard cubic centimeter per minute

エッチング時に印加するバイアスパワーを30 Wから180 Wの間で変化させ、**Figure 6(a)**のサンプルを1分間エッチン

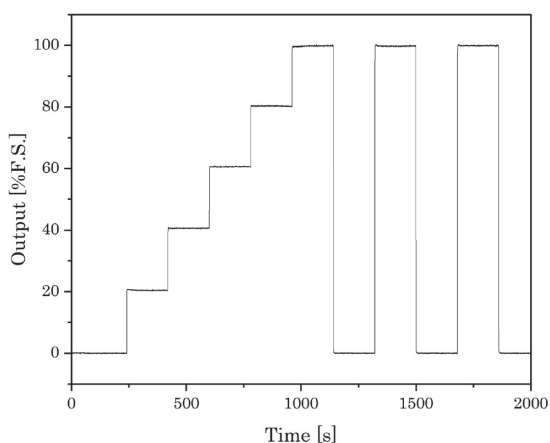


Figure 3 Measurement result of SiF_4 gas.

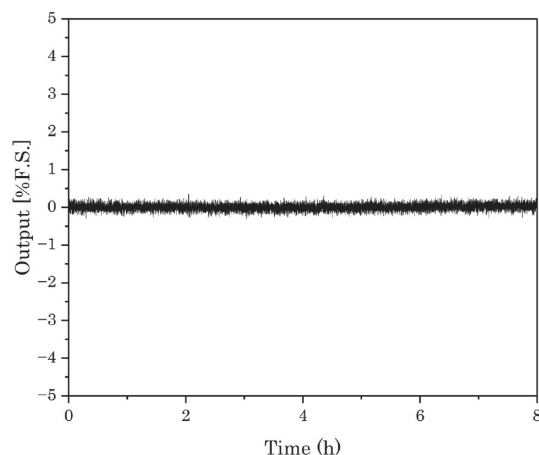


Figure 4 Zero noise and stability.

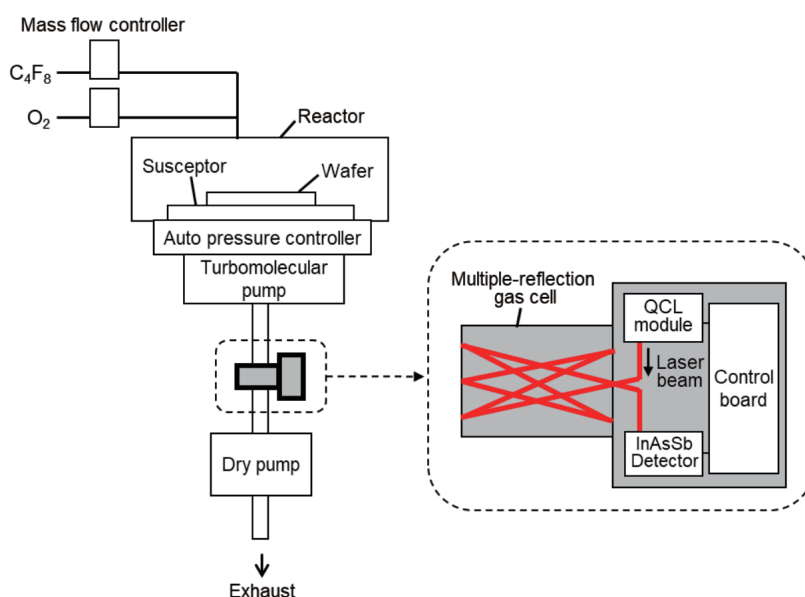


Figure 5 Schematic diagram of the etching tool with the laser gas analyzer.

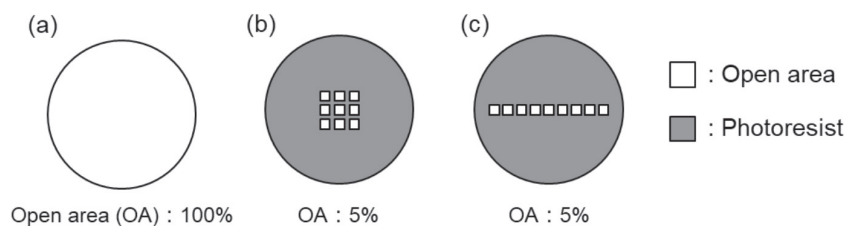


Figure 6 Schematic diagram of SiO_2 samples. Each open area ratio is 100% (a), 5% (b)/(c). There are two types of samples of 5% open area with different open area arguments, square type (b) and rectangular type (c).

グした際の SiF_4 分圧測定をFigure 7に示す。バイアスパワーが増加するにつれて発生する SiF_4 の分圧が増加する状況が確認された。バイアスパワーが高いほどプラズマイオンの入射エネルギーが高くなりエッチング量も増えることから、妥当な結果と考えられる。プラズマが停止すると同時に SiF_4 の値も低下しており、測定場所がチャンバーから離れた排気配管であっても遅れはないことが確認された。Figure 7(b)に各バイアスパワーにおける SiO_2 のエッチレートと SiF_4 の分圧の関係を示す。両者は0.999以上の高い相関関係にあることが確認され、この結果から SiF_4 の分圧を測定することで SiO_2 のエッチレートをリアルタイムに推定できる可能性があることが示唆された。

次に、Figure 6(b)および(c)に示すサンプルを基準条件であるバイアスパワー30 Wの条件でエッチングした結果を

Figure 8に示す。エッチングプロセスを開始後、それぞれ222秒と231秒の時点から SiF_4 の分圧の変化が始まり、242秒および297秒でその変化が収束している。これはSiのほうが SiO_2 よりもエッチレートが高いことによって生じており、分圧の変化が収束した点は、完全にSiに切り替わりエッチングのエンドポイントであることを示している。また、マスクパターンの違いによって SiF_4 の挙動に差が見られている。この差は、チャンバーのコンディションによるばらつきも含まれるが、主要因としてはマスクパターンの形状の差によって発生していると考えられる。これらの結果より、 SiF_4 の分圧変化を測定することでエッチングエンドポイントを検出できるだけでなく、マスクパターンの違いによる SiF_4 分圧の挙動の差異を観測できることが分かった。

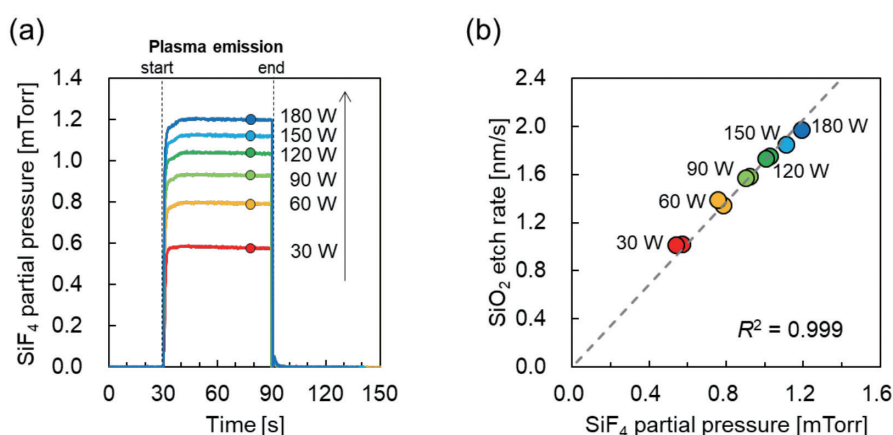


Figure 7 Measurement of SiO_2 etching with bias power in the range of 30–180 W for 1 min using the sample of 100% open area: trend of SiF_4 partial pressure (a). Correlation between SiF_4 partial pressure and SiO_2 etch rate (b).

おわりに

今回開発したIRLAM技術による半導体ガス分析計(LG-100)は、エッチングプロセスの排ガス中の副生物の分圧の変化を高い感度で検知可能であり、その情報からプロセスの状態を把握できることが分かった。近年、AI技術や機械学習が発展し、半導体製造装置においても、それらの技術を活用し装置を自律制御する方向に研究開発が進められている。複雑なプロセスを制御するために多くのパラメータが収集され、多変量解析等によってデータの意味を推測する手法が使われているが、本質的にプロセス状態と直結する質の高いデータが得られるほど、より精密な制御が可能になると考えられる。本分析計を用いて得られる測定データが、プロセスのリアルタイムでの監視や制御に活用できる新たな情報を与え、デバイスの製造工程の効率化、歩留まり改善に貢献していくことを期待している。

*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

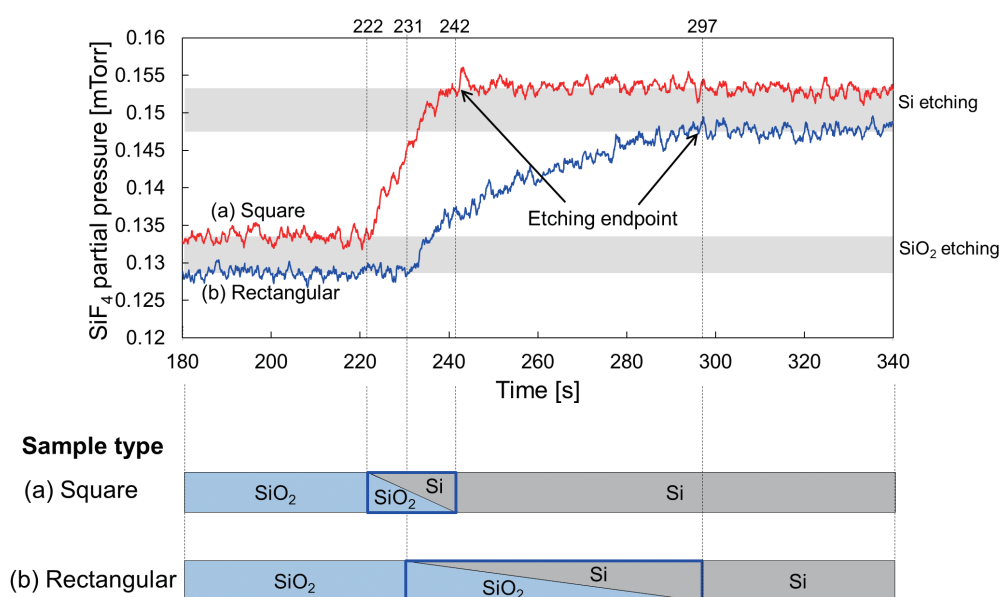
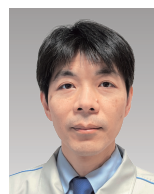


Figure 8 Trend of SiF_4 partial pressure and schematic diagram of etched layer transition during etching with the samples of 5% open area: square type (a) and rectangular type (b).

参考文献

- 【1】 Xiaoyue Wang et al.: Three-dimensional transistors and integration based on low-dimensional materials for the post-Moore's law era, Materials Today, Vol 63, 170 (2023)
- 【2】 辰巳哲也: 半導体デバイス加工におけるプラズマ制御技術, 応用物理, 第85巻, 第9号, 761(2016)
- 【3】 飯田裕: 半導体製造プロセスでのプラズマ発光分析終点検知モニタEV140Cの実用例, Readout, Vol.35, 62(2009)
- 【4】 石田耕三: 赤外線ガス分析計の開発, Readout, Vol.32, 65(2006)
- 【5】 渋谷享司: 量子カスケードレーザと独自の濃度演算手法を用いたガス分析技術「IRLAM」の開発, Readout, Vol.57, 55(2023)
- 【6】 岸田創太郎: 高温対応静電容量型隔膜真空計VG-500シリーズの開発, e-Readout-004-2 (2021)



坂口 有平

SAKAGUCHI Yuhei

株式会社堀場エステック
開発本部 開発3部 副部長(ガス分析担当)
Manager
Development Dept.3,
Research & Development Division,
HORIBA STEC,CO., Ltd.



波田 美耶子

HADA Miyako

株式会社堀場エステック
開発本部 開発3部 ガス分析1チーム サブリーダー
Assistant section leader,
Gas Analysis team1, Development Dept.3,
Research & Development Division,
HORIBA STEC,CO., Ltd.