

半導体ウェットプロセスに求められる計測技術と 応用事例

Measuring Technology and Applications for Demands from Wet Process

井上 健太郎

Kentaro INOUE

鈴木 理一郎

Riichiro SUZUKI

半導体製造におけるウェットプロセスでは、用途に応じて種々の薬液や大量の超純水が使用されている。半導体デバイスの歩留り向上のためにはそれらの薬液や超純水の管理が重要である。半導体デバイスの微細化や複雑化に伴う新たな処理プロセスや薬液の登場により、求められる管理指標はその時々で変化してきた。HORIBAグループでは、1980年代後半より、電気化学技術、光学技術等の基礎技術を応用したプロセスモニタを展開投入してきた。本稿ではそれらのウェットプロセス向けのモニタリング技術と応用事例について紹介する。

Various kinds of chemicals and large amounts of ultra-pure water are used in semiconductor wet process. Management of those chemicals and ultra-pure water is important for improvement of process yields. Due to increasing complexity and miniaturization of semiconductor devices, new processes and chemicals are appearing, which can often require changes required process control levels. HORIBA has been providing various process monitors based on electrochemical or spectroscopic technologies for wet process since the late 1980s. This paper describes some of those techniques briefly and introduces several products for wet process and applications.

はじめに

HORIBAグループでは、1980年代後半より、電気化学技術、光学技術等の基礎技術を応用した半導体製造向けのプロセスモニタを市場に投入してきた。超純水管理用途の比抵抗計、パーティクルカウンタ、シリカ濃度計をはじめ、電気伝導率や、吸収分光法を利用した薬液濃度モニタなど、半導体製造プロセスにおいて欠かす事の出来ないウェットプロセスモニタが、多くの半導体工場に納入されてきた。現在では、それらの基盤となる製品と技術を活かし、さまざまな薬液種に対応するとともに、新たな薬液管理向けの計測ソリューションを提供している。本稿ではそれらのウェットプロセス向けの製品と応用事例について紹介する。

半導体ウェットプロセスについて

半導体製造プロセスでは、半導体ウエハの洗浄、ウェットエッチング、レジスト除去など、用途に応じて種々の薬液が使用されている。最先端プロセスでは、エッチングレートのわずかな変化や、極微細なパーティクル付着によってもデバイスの動作不良を引き起こす可能性があり、薬液の

管理は歩留り向上の面で非常に重要である。洗浄用途の薬液では、主に化学反応を利用して、基板表面に生成された薄膜や、表面に付着している微粒子、および金属不純物などを、薬液中に溶解させる、あるいは分解させることにより除去している。Table 1に代表的な除去対象物と使用される薬液種を示す。

Table 1 Contamination and Cleaning chemicals^[1]

除去対象物	使用薬液など	呼称
パーティクル	APM (NH ₄ OH/H ₂ O ₂ /H ₂ O)	アンモニア／過酸化水素水
	H ₂ 水	水素水 (機能水)
金属	DHCl	希塩酸
	HPM (HCl/H ₂ O ₂ /H ₂ O)	塩酸／過酸化水素水
	SPM (H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ /H ₂ O)	硫酸／過酸化水素水
	DHF	希フッ酸
	FPM (HF/H ₂ O ₂ /H ₂ O)	フッ酸／過酸化水素水
	HF/O ₃	フッ酸／オゾン
有機物	SPM (H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ /H ₂ O)	硫酸／過酸化水素水
	APM (NH ₄ OH/H ₂ O ₂ /H ₂ O)	アンモニア／過酸化水素水
	O ₃ 水	オゾン水 (機能水)
酸化膜	DHF	希フッ酸
	BHF (NH ₄ F/HF/H ₂ O)	バッファードフッ酸

Table 2 CS series line up^[2]

	測定セル内蔵型		測定セル分離型	
	CS-100シリーズ	CS-700シリーズ	CS-100F1シリーズ	CS-600Fシリーズ
外観				
特徴	基本シリーズ	多波長、高分解能	基本シリーズ	安定性向上
対象温度	20-30℃ (冷却器取付け可)	20-30℃	20-30℃	20-80℃

薬液槽に薬液を循環しながら使用する場合、調合した直後の薬液濃度は一定であっても、繰り返し使用している間に成分濃度が変化してしまう。このような濃度変化によりエッチング速度や洗浄効率に変化が生じることが、デバイスの歩留り悪化の一因となる。濃度が変化する要因としては以下のような現象が挙げられる。

- (1) 反応による副生成物生成や薬液成分の分解
- (2) 大気への揮発による成分濃度の低下、あるいは水の蒸発による成分の濃縮
- (3) 濡れたウエハを処理することによる水分の混入
- (4) 大気中の二酸化炭素との反応

このような濃度の変化を薬液濃度モニターで監視し、必要に応じて補給制御を行うことで、歩留り向上や薬液の経済的利用を実現できる。

ウェットプロセスに使用される測定手法

半導体製造プロセスで使用される多様な薬液種のうち、単成分の薬液は、電気伝導率や単波長吸光度と濃度との相関を見ることで測定することができる。2種類以上の混合薬液に対しては吸収分光法を採用し、複数成分の同時測定を可能としている。その他にも電気化学方式のセンサを使用して薬液のpHや薬液中の溶存酸素を測定することが可能である。

薬液濃度計CSシリーズ

CSシリーズ (Table 2) は吸収分光法を採用した混合薬液向けの濃度モニターである。薬液を濃度モニター内に導入して測定するCS-100シリーズや、測定セルを洗浄装置内に設置して光ファイバーを利用することでインライン測定を可能としたCS-100F1シリーズ、およびその上位機種であるCS-600Fシリーズなど、ユーザーの要求に応じて最適なカスタマイズを施した製品を提供している。近年では半導体製造プロセスの複雑化に伴い、より複数成分の測定が可能なCS-700をラインナップした。

測定原理

CSシリーズでは、薬液濃度の測定法として、紫外・近赤外吸収分光分析法を用いている。この手法では、紫外域と近赤外域の透過光を測定し、得られた吸光度スペクトルが基本的にはLambert-Beer則に従うことを利用している。Lambert-Beer則によれば、吸光度 $A(\lambda)$ は以下のような関係式で表される。

$$A(\lambda) = \log_{10}[I_0(\lambda)/I(\lambda)] = a(\lambda)LC$$

$I_0(\lambda)$: 入射光強度 $I(\lambda)$: 透過光強度

λ : 波長 $a(\lambda)$: 吸光係数

L : 試料セル光路長 C : 試料濃度

半導体製造プロセスで使用される薬液はある波長領域に特異な吸収を持つことが多く、かつ測定に適した吸収係数を持つ場合が多いため、吸光度測定が最適な測定法である。ただし、近赤外領域においては官能基の高次振動や混成振動による吸収が複雑に重なり合い、吸光度が成分濃度に比例するような単純なLambert-Beer則に従うことは少ない。また、近赤外領域では水の温度変化による吸光度変化が大きいことが知られている。そこで、これらの複雑な吸光度情報から外乱影響を各種補正によって取り除き、さらに多変量解析を用いることで多成分薬液の濃度を各成分独立に測定している。

装置構成

大きく分けて一体型とファイバー型の2種類の製品をラインナップしており、いずれの製品も電気系、光学系、サンプリング系を有している。光学系においては、信頼性を向上させるためセル移動方式を採用し、分光器機構から駆動部を排除している。Figure 1にCS-100の光学系の構成を示す。薬液測定時には、光源からの光が測定セルを透過して分光器に入る。これがサンプル光量(透過光量)となる。また定期的に測定セルを移動させることで、光源からの光を、測定セルを通さず同じ光路で測定することができ、これをリファレンス光量(入射光量)として得ている。このリファ

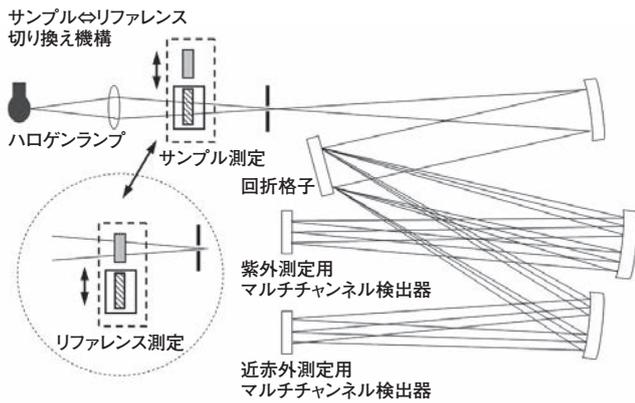


Figure 1 Optical system of CS-100

レンズ光量とサンプル光量の比を対数演算することで、前出の吸光度を算出し、濃度値の演算に用いている。

測定事例

3成分以上の混酸に、さらに副生成物が発生する場合について紹介する。一例としてSiウエハのエッチングで一般的に使われるフッ酸(HF)、硝酸(HNO₃)、Acid X、という3種の酸からなる液にエッチングによってSiが溶け込む場合のモニタリングを挙げる^[3]。一般的にエッチングが進行する

につれ、酸濃度が低下し、Siが反応してできる副生成物が発生する。

副生成物濃度が高い場合、吸収スペクトルに影響を与え、各酸の濃度測定結果の誤差要因となる。そこで、検量線作成時に、3種の酸と水にさらに、エッチングによる副生成物H₂SiF₆を成分の一つとして加え、5成分系として試料を調製し検量線を作成した。Figure 2に多波長高分解能のCS-700を用いた測定結果を示す。いずれの成分もH₂SiF₆の影響を受けずに良好な測定結果を示し、さらにH₂SiF₆の濃度も測定できる。

溶存オゾン濃度モニタ

CSモニタのような、複雑な分光器を用いることなく、単一波長の吸光度測定を利用して濃度を測定することも可能である。

半導体の洗浄やレジスト除去に環境負荷の少ないオゾン水が使われる場合がある。水中のオゾンは紫外光260 nm付近に吸収を持つため、254 nmに輝線を持つ水銀ランプを使用して、その吸光度からオゾン濃度を算出している。オゾン濃度モニタHZ-960ではオゾン濃度0~500 mg/Lまで測定可能である。

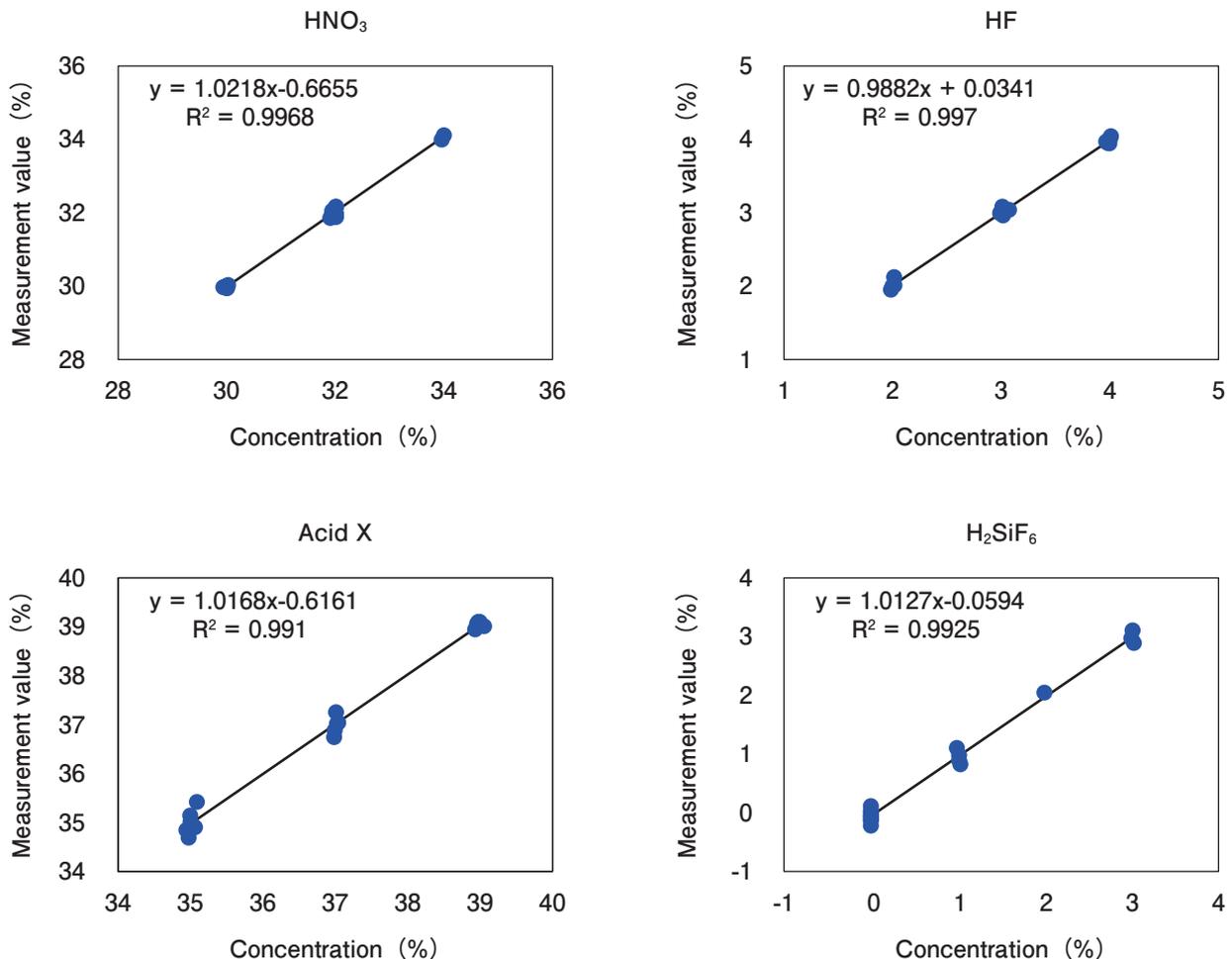


Figure 2 CS-700 measurement results of 5 components acid^[2]

シリカモニタ

超純水の精製にはイオン交換樹脂が用いられる。この樹脂が劣化するとシリカイオンがいち早く脱離するため、この濃度を監視することは半導体プロセスの安定化のためには重要である。

高感度シリカモニタSLIA-300は超純水中の極微量シリカイオンをモニタする装置であり、モリブデンブルー発色による比色法で測定している。シリカが含まれる超純水にモリブデン酸系の薬品を加え、還元反応によってできるモリブデンブルーと呼ばれる生成物に近赤外光を照射し、その吸光度からシリカ濃度を算出する。SLIA-300では長光路セルの採用により最小検出感度0.01 μg/Lでの測定が可能である。

長光路セル

新型の測定セルは、Figure 3に示すように、ステンレス管の中に光透過性と耐薬品性に優れたフッ素樹脂チューブを通した2重管構造となっている。サンプルはフッ素系樹脂チューブの内側を流れ、光の強度変化は管の長さ方向で測定する。管の片側から入ってきた光は、フッ素樹脂チューブと周りの空気との屈折率の差により、管内で反射を繰り返しながら反対側に到達する。(この光伝達のメカニズムは、光ファイバーのコアとクラッドとの関係をイメージすると理解しやすい。)このように測定セルをフレキシブルな2重管構造にすることにより、コンパクトな容器の中に1 mのセルを収納している。

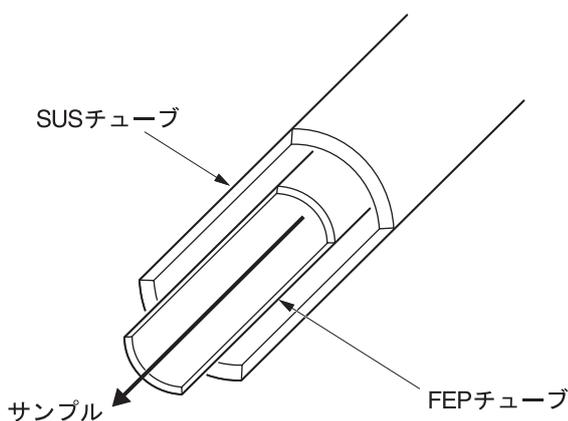


Figure 3 Measurement cell of SLIA-300^[4]

測定事例

2重管式の長光路測定セルは外乱光や温度変動の影響を受けやすくなる欠点はあるが、外乱光は測定セルに遮光構造を持たせることで、また温度変動は測定系を厳密に温調することによりクリアした。Figure 4にSLIA-300を超純水供給ラインに実装した時の連続試験結果を示す。0.2 μg/L付近の低濃度領域を十分にモニタできていることがわかる。

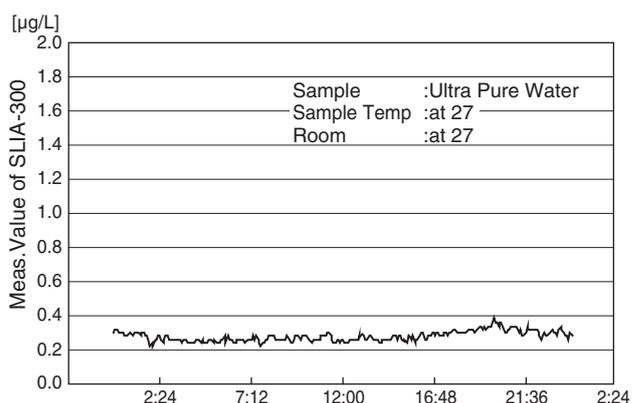


Figure 4 SLIA-300 measurement result of ultra-pure water^[4]

電気伝導率と比抵抗

比抵抗計

超純水は、洗浄、リンスなどの半導体プロセスに欠かせないユーティリティであり、その監視には比抵抗計が使用される。25℃の超純水の比抵抗(電気伝導率の逆数)は約18.2 MΩ cmである。一般的に、イオン性不純物が増加する、あるいは、水温が上昇すると比抵抗は低下する。不純物イオンによる電気伝導率の温度変化率に比べて、純水の電気伝導率の温度変化率が数倍高い。これは、水の電離平衡状態が、温度によって影響され、温度上昇に伴って、水素イオンと水酸化物イオンの濃度が上昇するためである。Table 3に純水の解離定数とイオンの濃度の関係を示す。

比抵抗計では、純水の温度と電気伝導率のデータベースと、不純物の電気伝導率の温度影響の両方の式から、独自の温度補償アルゴリズムを構築して、25℃の比抵抗を推定している。温純水では、50℃以上の超純水が用いられるので、温度補償は0-100℃の範囲で実用的な精度が要求されている。温度0.1℃の変化は比抵抗0.1 MΩ cmの変化に相当する。従って、温度補償用の温度計は、通常の温度計以上の精度が要求される。

Table 3 The water ionization constant and ion concentration^[5]

℃	-log Kw	Kw 解離定数	[H ⁺], [OH ⁻] mol/L	pH
5	14.733	1.85E-15	4.30E-08	7.37
15	14.346	4.51E-15	6.71E-08	7.17
25	13.996	1.01E-14	1.00E-07	7.00
35	13.680	2.09E-14	1.45E-07	6.84
45	13.396	4.02E-14	2.00E-07	6.70
55	13.136	7.31E-14	2.70E-07	6.57

電気伝導率計とその応用

洗浄やエッチングにフッ酸(HF)、Tetramethylammonium hydroxide (TMAH)、アンモニア(NH₃)の水溶液などを使用する場合、その原液を現場で希釈する方式が一般化して

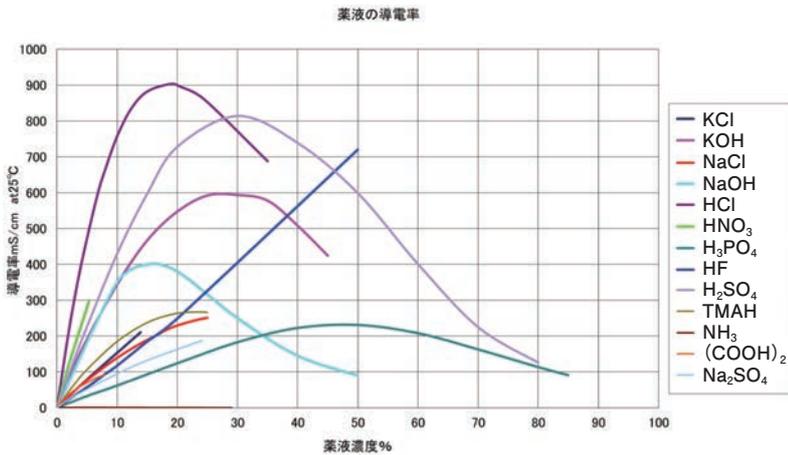


Figure 5 Conductivity characteristics of concerned chemical solution

Table 4 Practical concentration range converted from the conductivity for each chemical solution

成分	濃度範囲%	成分	濃度範囲%
HCl	0-15	NaOH	0-12
H ₂ SO ₄	0-20	TMAH	0-15
HF	0-50	NH ₃	0-2
HNO ₃	0-15	NaCl	0-23
(COOH) ₂	0-7	KCl	0-20
H ₃ PO ₄	0-30	K ₂ CO ₃	0-10
KOH	0-20	Na ₂ CO ₃	0-12

Table 5 Features of the conductivity measuring method

測定方法	2極法	4極法	電磁誘導法
センサの構造	電極2〜3個使用 構造が簡単	電極4〜6個使用 構造がやや複雑	電磁誘導方式のため、 コイルなど構造が複雑
測定範囲 (ラボ用機器を除く)	0-2 μS/cm〜 0-50 mS/cm	0-100 μS/cm〜 0-2000 mS/cm	0-100 μS/cm〜 0-2000 mS/cm
耐薬品性	電極とパッキンの耐薬品性で制限される	電極とパッキンの耐薬品性で制限される	ハウジング材の選定で耐薬品性の対応可能
電極の材質	SUS Ti Hastelloy, カーボンなど	SUS Ti Ni カーボンなど	使用しない
実用例	HF, HCl, NH ₃ , クエン酸	HF, HCl, TMAH, NaOH, KOH, シュウ酸, HNO ₃ , H ₃ PO ₄	HF, HCl, TMAH, H ₃ PO ₄
特長	低い電気伝導率の測定に適している。 高い電気伝導率では、電気二重層の飽和により、直線性が低下する。	高い電気伝導率でも直線性が得られる。 (電流/電圧は電気伝導率に比例する)	電気二重層の障害がなく、高い電気伝導率を測定できる。 低い電気伝導率の測定には限界がある。

おり、濃度調合のため、あるいは濃度確認のための濃度計は精度と信頼性が要求される。イオン性薬液の場合は、濃度を電気伝導率から変換することができる。ただし、濃度と電気伝導率が比例関係にあるとは限らないので、濃度変換できる範囲は限定されている。Figure 5に各種薬液の濃度と電気伝導率の関係を、Table 4に濃度変換可能な薬液の濃度範囲を示した。

電気伝導率測定方式

HORIBAでは3種類の電気伝導率測定方法の装置を提供しているが、その特質をTable 5にまとめた。

なお薬液濃度計として利用する場合は、薬液とウエハの反応で生じる副生成物による影響の可能性があること、また、アルカリ性溶液では、空気中の二酸化炭素の溶け込みによる影響を受けることがある点に注意が必要である。

薬液用溶存酸素(DO)計

ウェットプロセスで使用される薬液には通常数μg/L〜数mg/Lの酸素が溶解している。近年、この薬液中の溶存酸素がプロセスに影響を与えることが指摘されており、溶存酸素をモニタリングする必要性が高まってきた。測定は隔膜式ポーラログラフ方式の電極により可能である。

測定原理

Figure 6で示す構造のように、酸素に対して透過性が高い隔膜で極と内部液をサンプルから隔離し、電圧が印加されたカソード極表面にて、隔膜を透過してきた酸素が還元される。このとき電子がアノード極からカソード極に移動するので酸素ガスの還元反応に比例した還元電流が発生する。この還元電流を測定し、酸素ガス濃度に換算することで測定を行う。

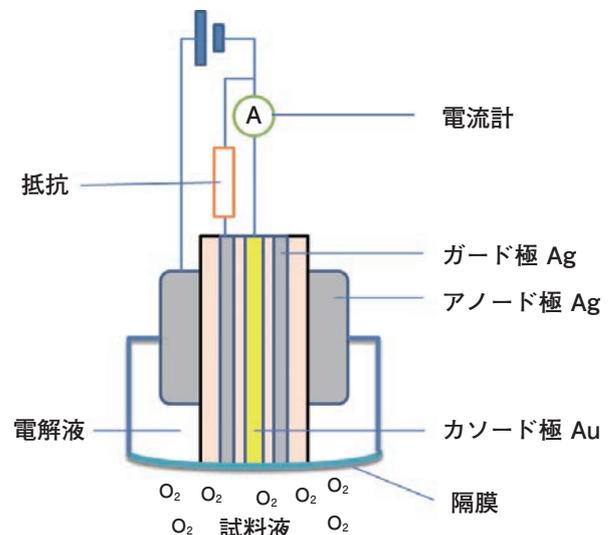


Figure 6 Membrane polarographic measurement principle^[6]

酸素ガスの還元に伴う化学反応を次に示す。



特徴

HD-960L (Figure 7) は薬液に特化した溶存酸素計である。センサは低濃度の応答を良くするためにガード極を設けた。内部電解液量の濃度の最適化と、ガード極への電流制限抵抗の配置により、高温薬液測定と内部電解液の長寿命化を実現した。評価試験の結果、飽和溶存酸素の信号は、低濃度での濃度変化に対する応答が十分速く、信号は濃度に対して直線的であることが確認された。センサを装着するフローチャンバは、スターラを装着し、低サンプル流量でも溶存酸素を安定に測定で可能である。



Figure 7 HD-960L (Left) / DO-100 (Right)

測定事例

薬液中の溶存酸素測定において、イオンは隔膜を通過できないので、基本的にはイオン成分は測定に影響しない。HFは水溶液中では100%電離せず、ほとんどが分子の状態が存在するが、低濃度ではHFの蒸気圧が低いため、実験的には影響を与えなかった。TMAHはほとんど電離しており、隔膜を通り抜けることができないので影響しない。純水を空気でバブリングしておき、HFおよびTMAHを添加しながら、飽和溶存酸素の信号の変化を確認したが、どちらも薬液の濃度を変えても影響を受けなかった。Figure 8と

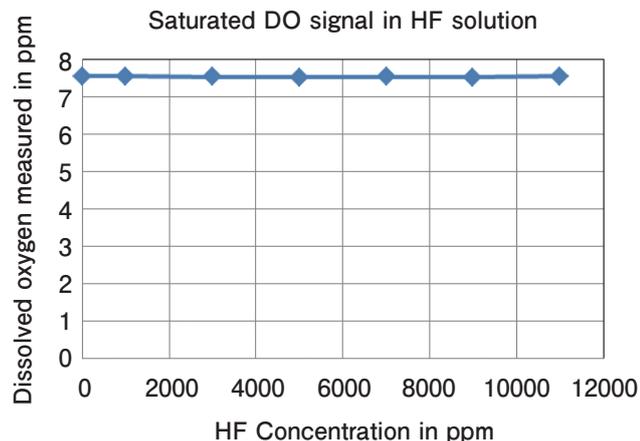


Figure 8 Measurement result of DO in HF solution

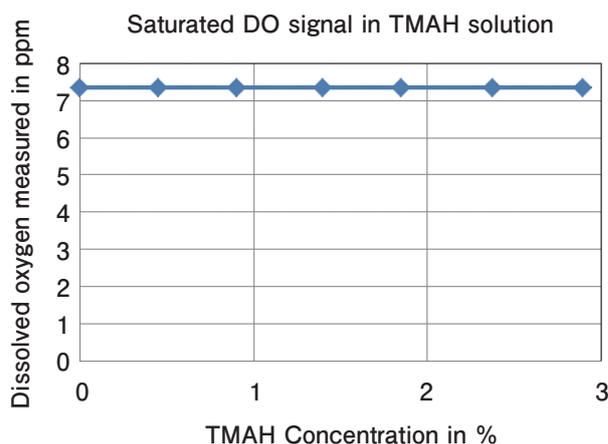


Figure 9 Measurement result of DO in TMAH solution

Figure 9にHFおよびTMAHの濃度を変えたときの空気飽和の状態の測定値を示す。

pH

pHはプロセス管理上重要なパラメータである一方、一般的なガラス電極では、サンプル中へのガラス成分や内部液の溶け出しによるサンプル汚染、校正や内部液の補充といったメンテナンスを要する点など、インラインへの導入は課題が多かった。

例えば、微量の塩化カリウム (KCl) の浸出が問題視される場合は、サンプルを一部取り出し、測定後に廃棄する必要があるが、サンプル液のロスによるコスト負荷や、廃液処理のコスト負荷が問題となる。また、定期的な校正や、電極へのKCl補充といったメンテナンスにおいても運転コスト、安全面でのデメリットがあった。

UP-100 (Figure 10) は自動校正、自動KCl補充機能を備えた、微量サンプリングpHモニタである。



Figure 10 UP-100

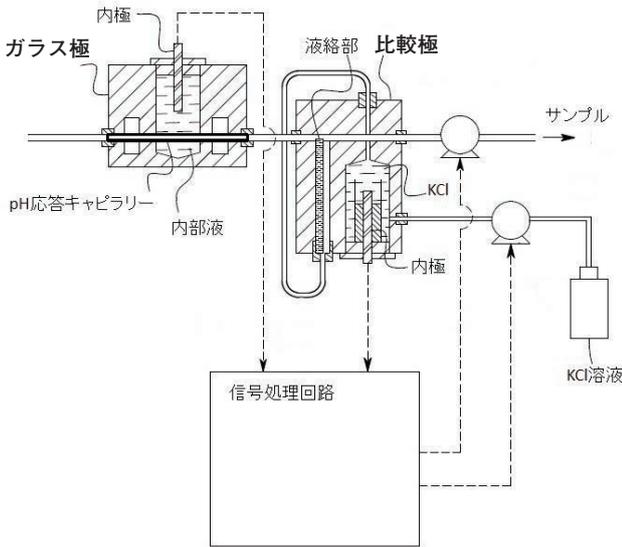


Figure 11 Capillary type pH electrode^[7]

特徴と構造

UP-100は1つのサンプルに、500 μLの極微量サンプル量で測定することができる。この微量サンプリングを実現した技術の要は電極部分(Figure 11)である。

一般的なpH電極はpH応答ガラスを介して外側にサンプル、内側に内部液があるロッド形状であるが、本装置では微量測定を実現するためにpH応答ガラスを内径0.6 mmのキャピラリー形状とした。このキャピラリー内部にサンプルを通し、外側に内部液がある構造となっている。また、比較電極は同じく流通型であり、高圧、高比重サンプルに耐える独自の構造を開発した。

測定事例

近年、半導体の洗浄プロセスでは数十 ppmというごく低濃度の薬液が使われることがある。pHは水素イオン濃度を対数で表しているため、中性付近ではごく微量の水素イオン濃度の変化を拡大して表すことができる。UP-100を用いて低濃度のアンモニア(NH₃)の測定を行った。

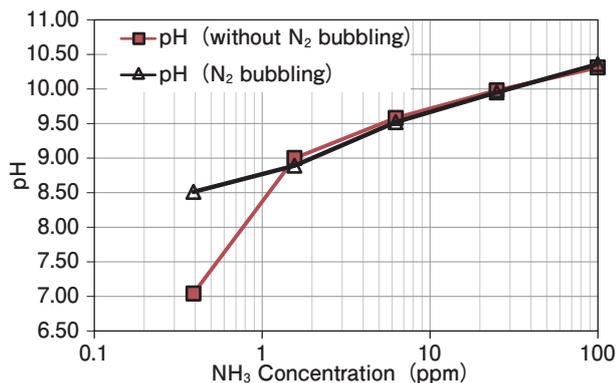


Figure 12 UP-100 Measurement result of NH₃

Figure 12にアンモニア濃度とpHの相関図を示す^[8]。測定時のサンプル液への空気中の二酸化炭素の溶解込みを考慮し、サンプルをN₂でバブリングした場合としない場合において測定をおこなった。N₂バブリングをおこなった場合は0.3 ppmから100 ppmの範囲においてpHとアンモニア濃度の対数は良好な線形性を示した。

イオン電極

イオン電極のプロセスモニタへの応用として、pH電極とフッ化物イオン電極を組み合わせた、硫酸、過酸化水素、微量HF混合液中のHF濃度測定の場合が挙げられる。

前処理として試料に強アルカリ性の中和液を加えてpHを中性付近に調整する。中性付近においてHFはフッ化物イオンと水素イオンとに乖離する。乖離したフッ化物イオン濃度をイオン電極で測定し、元のHF濃度に換算することが可能である。硫酸過水中の低濃度HF濃度計であるHF-700(Figure 13)は前処理としてpH電極を用いた自動中和装置を組み込んでおり、混酸中微量HFの連続測定が可能である。

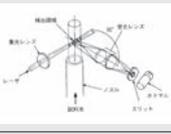
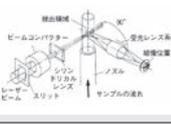
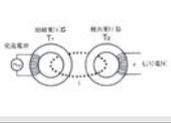
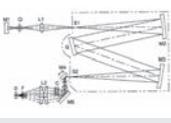
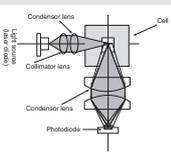
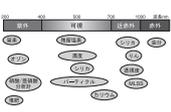


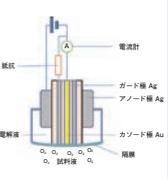
Figure 13 HF-700

おわりに

半導体製造プロセスの微細化や複雑化、あるいは新たな処理プロセスや薬液の登場により、モニタへの要求はその時々で変化してきた。今後、さらにプロセスの複雑化が進むにつれ、より一層プロセスモニタリングの重要性が増し、モニタへの要求もまた変化すると予想される。液体計測のエキスパートとして、これまでの常識や計測原理にとらわれず、よりお客様の近くでベストソリューションを提供していきたい。そして、半導体業界ひいては人々の生活の利便性向上に少しでも寄与していきたいと考える。

Table 6 Readout関連記事(半導体薬液)

標題	著者	号	頁	発表年	
半導体製造プロセス用液体中微粒子計測装置(PLCAシリーズ)	鈴木 理一郎	2	37	1991	
薬液用微粒子カウンターPLCA-700	久保 良宏	4	37	1992	
半導体デバイス製造プロセス用フッ化水素酸濃度モニターCMシリーズ-電気伝導率ではかる-	福嶋 良助 隅田 晋一	8	35	1994	
近赤外線吸収法を用いた半導体洗浄プロセス用薬液濃度モニターCS-200シリーズ	井上 克 横山 一成	10	99	1995	
半導体プロセスにおける薬液濃度管理	廣藤 裕一 (松下電子工業株式会社) 大西 照人 (松下電器産業株式会社)	13	31	1997	半導体プロセスに使用されている薬液の濃度管理は、薬液の使用量を抑制することの他に、多元の混合液による機能洗浄液を開発するために不可欠な技術となりつつある。
半導体デバイスの生産歩留まりの向上に大きな威力を発揮する薬液/レジスト用インライン・パーティクルセンサ PLCA-800	製品紹介	17	40	1998	
安定した洗浄効率の確保とランニングコスト削減に威力を発揮する高精度薬液濃度モニターCS-340シリーズ	製品紹介	17	42	1998	
半導体洗浄プロセスにおけるIPAの純度管理に最適 IPA比抵抗計 IP-960	製品紹介	17	46	1998	
薬液用インラインパーティクルセンサ PLCA-800シリーズ	湯原 義公	21	35	2000	
薬液濃度モニターを通して見た韓国の半導体市場へのアプローチ	NAC-HYUNG SONG	25	33	2002	
SC-1モニター CS-131	製品紹介	25	38	2002	
コストの基盤技術と製品展開	佐々木 一訓 鈴木 理一郎 内村 幸治	26	48	2003	

標題	著者	号	頁	発表年	
太陽電池製造工程で用いられる薬液とその計測	中井 陽子 植田 恭弘	37	62	2010	
薬液濃度モニター CS-100Z	斧田 拓也	41	88	2013	
自動校正・KCI補充を実現した微量サンプリングpHモニター UP-100	中井 陽子 宮村 和宏	46	82	2016	
吸収分光法を用いた工業プロセス用多成分薬液濃度モニターとその応用事例	中井 陽子	47	47	2016	
カーボン電極を用いた電気伝導率計と濃度計への応用 実用的な濃度計とするための技法	鈴木 理一郎	47	52	2016	
半導体薬液用溶存酸素計(HD-960L) 低濃度・高温・低流量・耐薬品性を実現した、半導体薬液用の溶存酸素計の特性について	井上 健太郎	47	57	2016	

参考文献

- [1] 斧田拓也, *Readout*, 41, 88(2013)
- [2] 中井陽子, *Readout*, 47, 47(2016)
- [3] 大見忠弘 編著: “ウェットサイエンスが拓くプロダクトイノベーション”, Sipec(2001)
- [4] 佐々木一訓, 鈴木理一郎, 内村幸治, *Readout*, 26, 48(2003)
- [5] H. S. Harned, R. A. Robinson, *Trans. Faraday Soc.*, 36, 973(1940)
- [6] 井上健太郎, *Readout*, 47, 57(2016)
- [7] 中井陽子, 宮村和宏, *Readout*, 46, 82(2016)
- [8] Y. Nakai, K. Miyamura, Y. Mori, 228th ECS meeting(2015)



井上 健太郎

Kentaro INOUE

株式会社 堀場アドバンスドテクノ
開発本部 アプリケーション開発部
Application Development Department
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.



鈴木 理一郎

Riichiro SUZUKI

株式会社 堀場アドバンスドテクノ
開発本部 要素開発部
Core Technology Development Department
HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd.