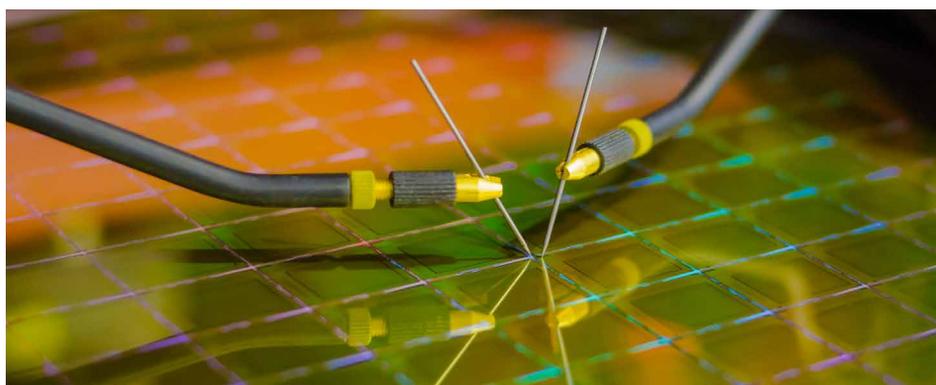


ガス交換装置（GED）-ICP-MS による 半導体産業用特殊ガス中の金属不純物の 分析

ICP-QQQ と GED および金属標準エアロゾル発生との
組み合わせによる HF および Cl₂ ガス中の金属および
ナノ粒子の総量の測定



著者

Koshi Suzuki, Kohei Nishiguchi,
and Katsu Kawabata, IAS Inc,
Hino, Tokyo, Japan

Michiko Yamanaka, Agilent
Technologies, Inc., Hachioji,
Tokyo, Japan

はじめに

半導体は、現代生活に欠かせない日常の電子製品に幅広く使用されています。集積回路（IC）のデザインおよび製造に関連する技術は、より高い集積密度およびより低いエネルギー消費とともに、高速化および小型化を求める産業需要を満たすために進展し続けています。IC アーキテクチャが進化するにつれ、構造は複雑化され、線幅は狭くなり、製造ステップは増大しています。半導体産業で使用される化学薬品の品質管理は、チップデザインの開発と歩調を合わせる必要があります。

IC 製造では、高純度のさまざまな特殊ガスが使用されています。例えば、シリコンウエハのエッチングや洗浄にはフッ化水素 (HF)、アルミニウム層や他の金属層のプラズマエッチングには塩素 (Cl₂) が使用されます。ガスに不純物が存在すると、最終デバイスの歩留まりやパフォーマンスに影響することがあるため、これらのタイプのガスの分析は重要です。

IC の製造を通して使用される化学薬品中の超微量レベルの金属汚染溶解元素および不溶性のナノ粒子 (NP) の測定には、一般的に ICP-MS などの高感度分析技法が使用されます (1)。通常、ガス中の金属不純物は、単一元素粒子または、複数の元素を含む化合物 (微粒子状またはガス状) です。しかし、ICP-MS ではガスを直接分析することは困難で、これらのガスが少量であっても ICP-MS のアルゴン (Ar) プラズマは消失します。また、粒子の定量に使用できる金属ガス標準もありません。

ICP-MS 対応の IAS ガス交換装置 (GED) 導入システムは、大気中の粒子状物質の分析に使用されている実証済み技術です (2~4)。図 1 に、この技術の原理の概要を示します。金属粒子を含むサンプルガスはメンブレンチューブの内側に導入されます。一方、Ar スweepガスフローはメンブレンの外側に導入されます。Ar スweepガスはサンプルガスよりもはるかに高速なため、サンプルガスは Ar ガスにほぼ完全に (>99.99%) 置換されます。粒子はメンブレンを通過することができないため、中央の Ar ガスストリームとともに GED を出て行き、その後、ICP-MS のプラズマに導入され分析されます。粒子の分析時、サンプルガスラインチューブ中のサンプルガスの速度が重要となります。より小さな粒子ではそのブラウン運動、より大きな粒子では重力に対して、粒子損失を最小にできるように最適化することが必要です (5)。

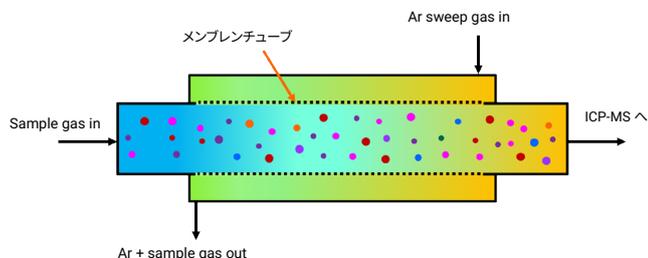


図 1. IAS ガス交換装置の原理。IAS の許可を得て転載しています。

粒子の分析には、単一ナノ粒子 (sp) 分析モードが使用されます。splICP-MS では、より短いドウェルタイムを使用して、バックグラウンドノイズを超える小さい粒子の信号形状を容易に区別できます (6、7)。しかし、ガスは GED メンブレンで Ar ガスに置換されるため、ガス状不純物の分析に GED は使用できません。ICP-MS へのガスサンプルの直接導入は、メンブレンなしで GED を使用し、ソフトウェアでスペクトルデータ解析モードを設定して実現できます。GED ソフトウェアでは、両方の解析 (スペクトルナノ粒子および単一ナノ粒子) を自動で実行できます。

HCl、HF、Cl₂、NH₃ などの重要かつ腐食性のあるガスの分析用に、電解研磨されたステンレスセルに囲まれたメンブレンを使用する新しい GED が開発されています。このセルには、ガス導入ラインが 6 本ある GED_SEMI とガス導入ラインが 1 本の GED_LAB の 2 つの IAS GED モデルがあります。

GED-ICP-MS によるガスの定量分析には、IAS 金属標準エアロゾル発生 (MSAG) ユニットも必要です (図 2)。MSAG は、Ar のガス流量が 0.3 L/min で動作するように特別に設計されたネブライザに、水性元素標準溶液を数 μL/min で供給します。このシステムはすべての標準溶液を ICP-MS のプラズマに導入します。そのため、プラズマに導入される標準溶液の絶対量を MSAG ソフトウェアで数学的に計算できます。そして、ICP-MS 信号の強度から感度係数を ag/カウント (10⁻¹⁸ g/カウント) で計算することができます。ICP-MS を用いて時間分析 (TRA) モードで信号が測定されると、検出された粒子の直径に相当する、単一粒子の重量が感度係数によって求められます。粒子の濃度は、検出された粒子の総量 (重量) と分析中にプラズマに導入されたサンプルガスの総量から計算できます。MSAG ソフトウェアによって処理されたデータは、GED ソフトウェアに自動的に送信されて最終結果のレポート作成に使用されます。

今回の調査では、HF および Cl₂ ガスの分析用に、GED_LAB が Agilent 8900 トリプル四重極 ICP-MS (ICP-QQQ) と統合されました。IAS は、ICP-MS MassHunter 用の Agilent ソフトウェア開発者向けキット (SDK) を使用して、GED ソフトウェアから GED-MSAG-ICP-MS ワークフローを完全に制御するソフトウェアを開発しました。

実験方法

試薬およびサンプル

ICP-MS の検量線作成のために、10 ppm 多元素標準液 (XSTC-622B、SPEX CertiPrep、ニュージャージー州、米国) から 0.5% HNO₃ で、10 ppb 標準原液を調製しました。0.5% HNO₃ 酸ブランクおよび標準希釈液は、TAMAPURE AA-100 HNO₃ (多摩化学工業株式会社、神奈川、日本) を使用して調製しました。脱イオン水 (DIW) は、ピュリック ω (オルガン株式会社、東京、日本) を使用して生成しました。すべての化学薬品は、ISO Class 5 クリーンルームで調製されました。サンプルガス、ガス圧カレギュレータ、粒子フィルタは、日本のガス会社から購入しました。

装置構成

図 2 に、GED-MSAG-ICP-MS 技術の概略図を示します。このシステムは、サンプルガスラインに挿入されたフィルタを含めて構成されています。粒子がサンプルガスに由来するものかをチェックするために、GED メンブレンを使用しフィルタを付けた場合と付けない場合で分析を実行しました。サンプルガス中のガス状不純物を分析するために、少量のサンプルガスがメンブレンをバイパスし、希釈 Ar ガスを介して ICP-MS のプラズマに直接導入されました。

キャリブレーションと定量のために、MSAG は 2 個のシリンジから固定量の溶液を 3 μL/min で導入しました。このメソッドを使用して、水性標準溶液のドライプラズマへの追加で生じるマトリックス効果を防止しました。酸ブランクおよび多元素混合標準液は、MSAG の各シリンジから導入しました。酸ブランクと標準溶液の比を変えて、検量線を作成しました。

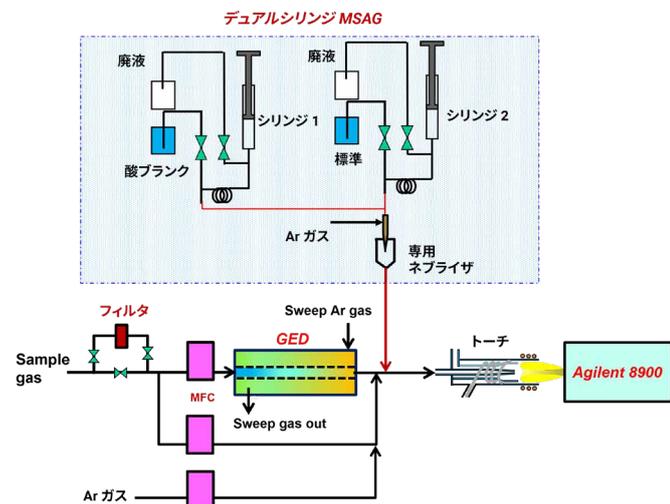


図 2. Agilent 8900 ICP-QQQ に接続した GED-MSAG システムの概略図。IAS の許可を得て転載しています。

表 1 に、半導体グレードの HF ガスと Cl₂ ガスの分析で使用する GED の使用条件を示します。

表 1. IAS GED_LAB 使用パラメータ

パラメータ	設定値	
	HF 溶液	Cl ₂
粒子分析用のサンプルガス流量 (mL/min)	1000	400
スイープ Ar ガス流量 (mL/min)	6000	4000
スイープガス出口圧力 (kPa)	9.8	9.8
MSAG ネブライザ Ar ガス流量 (mL/min)	300	300
MSAG 10 ppb 標準溶液流量 (μL/min)	1	1
Ar メークアップガス流量 (mL/min)	450	300
直接分析用のサンプルガス流量 (mL/min)	5	1
直接分析用の Ar 希釈ガス流量 (mL/min)	1130	1230

Agilent 8900 半導体仕様 ICP-QQQ に、標準構成と 2.5 mm Pt インジェクタ付で HF-耐性のある PFA イナートトーチ、および Pt サンプリグコーンを装着しました。標準の s- レンズは、オプションの m- レンズ (部品番号 G3666- 67500) とオプションの m- レンズ用の白金製チップ付きニッケルベーススキマコーン (部品番号 G3666-67501) に取り替えました。m- レンズの使用により、アルカリ金属用により低い検出限界を得ました。

ICP-QQQ メソッドのセットアップに GED ソフトウェアを使用して、単一のマルチチューン取り込みを使用して複数のセルガスモードで分析対象物を測定しました。今回の分析では、ノーガスモード、アンモニア反応モード (NH₃ と He のセルガスの混合物を使用)、および酸素反応モードを使用し、オンマス測定とマスシフト測定を組み合わせることで干渉を除去しました。データ取り込み中に、セルガスと測定モードを自動的に切り替え、各分析対象物に最適なモードを使用し、分析の高速化と自動化を実現しました。すべてのガスモードに対して同じプラズマ条件を使用しました。表 2 に、機器の取り込みおよび操作パラメータを示します。8900 ICP-QQQ のベーシックチューニングは、MSAG から 1 μL/min で 10 ppb 標準原液を Ar ガスとともに導入することによって、実行されました。0.5% HNO₃ ブランク溶液には流量 2 μL/min を使用しました。

分析時間を最小にするために、すべての元素に対してスペクトルモードを使用する標準添加法（MSA）によって検量線を作成しました。粒子分析の実行時は、1 ms のドウェルタイムの spICP-MS モードおよび同じチューニングパラメータを使用しました。

表 2. Agilent 8900 ICP-QQQ の操作パラメータ

パラメータ	設定値		
		ノーガス	NH ₃ /He
スキャンモード	MS/MS		
サンプリング深さ (mm)	15		
RF 出力 (W)	1200		
セルガス	-	NH ₃ 35 % He 1 mL/min	25 %

結果と考察

フッ化水素（HF）

粒子分析

図 3 に、1 ms のドウェルタイムの spICP-MS モードを使用して得られた HF の粒子分析結果を示します。横軸はデータ取り込み時間を、縦軸は 1 ms 当たりのカウント数で ICP-MS 信号強度を示しています。イオン強度は元の粒子に含まれるターゲット元素の質量に比例するため、粒子が球状であるという仮定をもとに、粒子サイズを求めることができます。

図 3 のデータは、フィルタリングされない HF ガス中に Fe、Ni、Cr、Mn、Na、K、Ca、Sn、W などの元素のさまざまなサイズの粒子が多数あること、フィルタリングされた HF ガス中に Fe 粒子が大幅に少ないことを示しています。これらの結果から、ほとんどの粒子が GED を通過し、ICP-MS で検出されることが明らかです。Cu、Zn、Al、Sb、Ti を含む比較的少数の小さいサイズの粒子もバックグラウンド信号を超えて検出されています。

spICP-MS モードの短いドウェルタイム（1 ms）によって、各データポイントでバックグラウンドカウントが低くなります。このため、図 3 に示すように、多くのさまざまな元素の小さいサイズの粒子を spICP-MS モードで容易に測定できました。

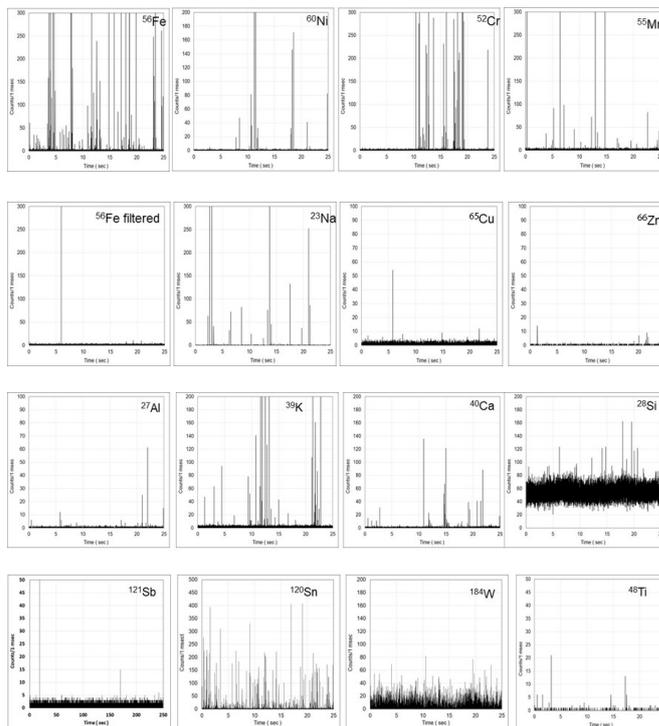


図 3. spICP-MS モードの GED-ICP-MS の使用による HF ガス中の元素の過渡信号

Si、Sb、W は、多数の小型サイズ粒子またはガス状不純物の存在のために、高い連続バックグラウンドを示しました。

ガス状不純物の分析

ガス状不純物を調査するために、HF ガスを 5 mL/min の流量で Ar 希釈ガスとともに ICP-MS に直接導入しました。図 4 に、一晩中かく乱されないまま放置されていたガスボンベからの HF 中のいくつかの元素の強度傾向を示しています。ガスボンベのバルブを開けた後、B、Ge、Sr、Sn、Sb が ICP-MS で分析されました。最初に Sb、Sn、Ge、B の信号は増大し、5 分以内に急降下した後、次の 5 分間では少しずつ降下しました。これらの結果は、分析前に HF ガスボンベ中のガス相と液相の平衡状態を待つことがベストプラクティスであることを示しています。11 分後に Sb と Sn の先端がとがった信号が検出されましたが、これは、HF ガスボンベ内で HF が沸騰したことが原因で生じた可能性があります。

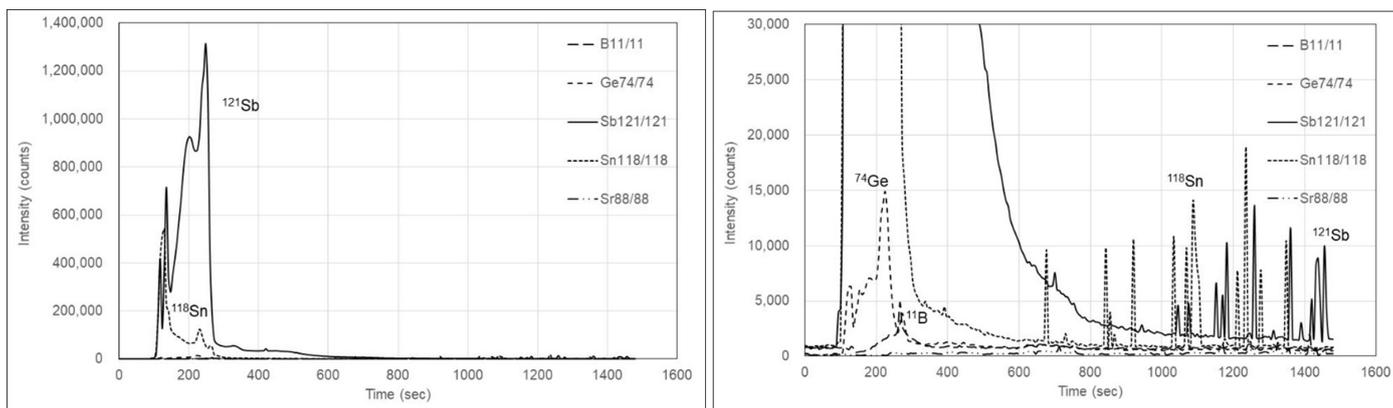


図 4. バルブを開いた後の HF ガス中の元素の傾向 (Y 軸の強度スケールを変えて同じデータを表示)

スペクトルモードを使用した HF の直接分析では、質量ごとに 1 s の積分時間を使用しました。表 3 に、Ar ガスブランクおよび HF ガスサンプルの感度係数 (ソフトウェアで計算) を示します。B、P、Cu、Ge、W などのいくつかの元素では Ar ガスブランク中よりも HF ガスサンプル中の方がより高い信号を示しましたが、これは揮発性のフッ素化合物に起因する可能性があります。HF マトリックスに起因して、ほとんどの元素に対して、HF ガスの感度係数は Ar ガスよりもわずかに高くなりました。B および P のバックグラウンドのカウント数は他の元素よりも大きいため、MSAG 標準溶液中でこれらの元素の濃度を高くして感度係数の精度を向上させる必要があります。

HF 中のガス状金属不純物と粒子状不純物

表 3 に、HF ガス中のガス状金属不純物と粒子状不純物の概要を示します。前述のように、直接ガス分析ではスペクトルモードを 1 s の積分時間で使います。一方、splCP-MS モードは TRA モードを 25 s の測定時間で使います。すべてのデータは、導入される HF ガスの感度係数と質量を使用して GED ソフトウェアによって自動的に計算されます (2 つのメソッドそれぞれの流量と積分時間を基に)。

Mg、Al、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Ge、および Ba の粒子は GED-splCP-MS メソッドを使用して検出されましたが、これらの元素は直接ガス分析メソッドでは検出されませんでした。GED-splCP-MS 濃度データは ng/kg で報告されました。この単位がスペクトルモードを使用して報告されたデータ (μg/kg) よりも 1/1,000 の単位となる理由は、GED-splCP-MS では直接ガスメソッドよりも大幅に高速のガス流速が使用されるためです。

表 3. スペクトルモードの直接ガス ICP-MS 分析で得られたガス状不純物データ、および GED-ICP-MS の単一粒子分析モードで得られた粒子を示す、HF ガス分析結果の概要

分析対象物	Q1 質量数	Q2 質量数	ガス状不純物						粒子	
			積分時間 (s)	Ar ガス		HF ガス		ブランク補正済濃度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	HF ガス	
				感度係数 (ag/count)	濃度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	感度係数 (ag/count)	濃度 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)		積分時間 (s)	濃度 (ng/kg)
Li	7	7	1	19	< 0.002	15	0.003	N.D.	25	N.D.
B	11	11	1	14	2	88	99	97	25	N.D.
Na	23	23	1	10	0.09	11	2	1	25	0.02
Mg	24	24	1	16	< 0.003	16	< 0.002	N.D.	25	0.006
Al	27	27	1	29	< 0.01	31	< 0.01	N.D.	25	0.008
P	31	47	1	93	0.6	12	124	123	25	N.D.
K	39	39	1	7	0.1	7	0.1	N.D.	25	0.03
Ca	40	40	1	24	< 0.06	26	< 0.06	N.D.	25	0.03
Ti	48	64	1	28	< 0.005	29	0.1	0.1	25	0.007
V	51	51	1	23	< 0.003	24	0.008	0.005	25	N.D.
Cr	52	52	1	23	< 0.007	27	0.023	0.02	25	0.1
Mn	55	55	1	14	0.012	16	0.007	N.D.	25	0.1
Fe	56	56	1	17	0.01	20	0.03	0.02	25	0.8
Co	59	59	1	20	< 0.004	23	< 0.004	N.D.	25	0.002
Ni	60	60	1	92	< 0.07	106	< 0.07	N.D.	25	0.1
Cu	65	65	1	12	0.006	15	0.3	0.3	25	0.02
Zn	66	66	1	137	< 0.08	177	< 0.04	N.D.	25	0.009
Ga	69	69	1	18	< 0.003	23	0.009	0.006	25	N.D.
Ge	74	90	1	38	0.02	40	0.2	0.2	25	0.03
As	75	91	1	167	0.2	172	418	418	25	N.D.
Se	80	96	1	2012	< 0.3	2198	0.8	0.5	25	N.D.
Sr	88	88	1	10	< 0.003	11	< 0.003	N.D.	25	N.D.
Zr	90	90	1	17	< 0.002	21	< 0.002	N.D.	25	N.D.
Mo	98	98	1	48	< 0.01	57	0.05	0.04	25	N.D.
Ag	107	107	1	22	< 0.003	26	< 0.007	N.D.	25	N.D.
Cd	111	111	1	26	< 0.002	29	0.02	0.02	25	N.D.
Sn	118	118	1	32	< 0.009	39	0.03	0.02	25	1
Sb	121	121	1	37	0.02	43	0.05	0.03	25	0.5
Ba	138	138	1	11	< 0.002	11	< 0.001	N.D.	25	0.002
W	184	184	1	31	< 0.008	29	0.04	0.03	25	0.09
Pb	208	208	1	17	< 0.004	16	< 0.003	N.D.	25	N.D.

塩素 (Cl₂)

図 5 に、GED-ICP-MS を spICP-MS モードで使用し、フィルタありの場合となしの場合で採取した Cl₂ ガスに対する粒子分析結果を示しています。フィルタなしの場合、高いカウント数で Ca、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu 粒子が検出されましたが、P、Ge、As、Sn、Sb は揮発性塩素化合物が原因の可能性のある連続的なバックグラウンドを示しました。

Ba、W、および Bi では、低いカウント数が観察されました。しかし、フィルタなしの場合、カウント数が 1 の信号の頻度は、フィルタ有りの場合よりも多く、これは粒子が小さいことに起因している可能性があります。なぜなら、Ba、W、および Bi は揮発性塩素化合物を形成しないからです。

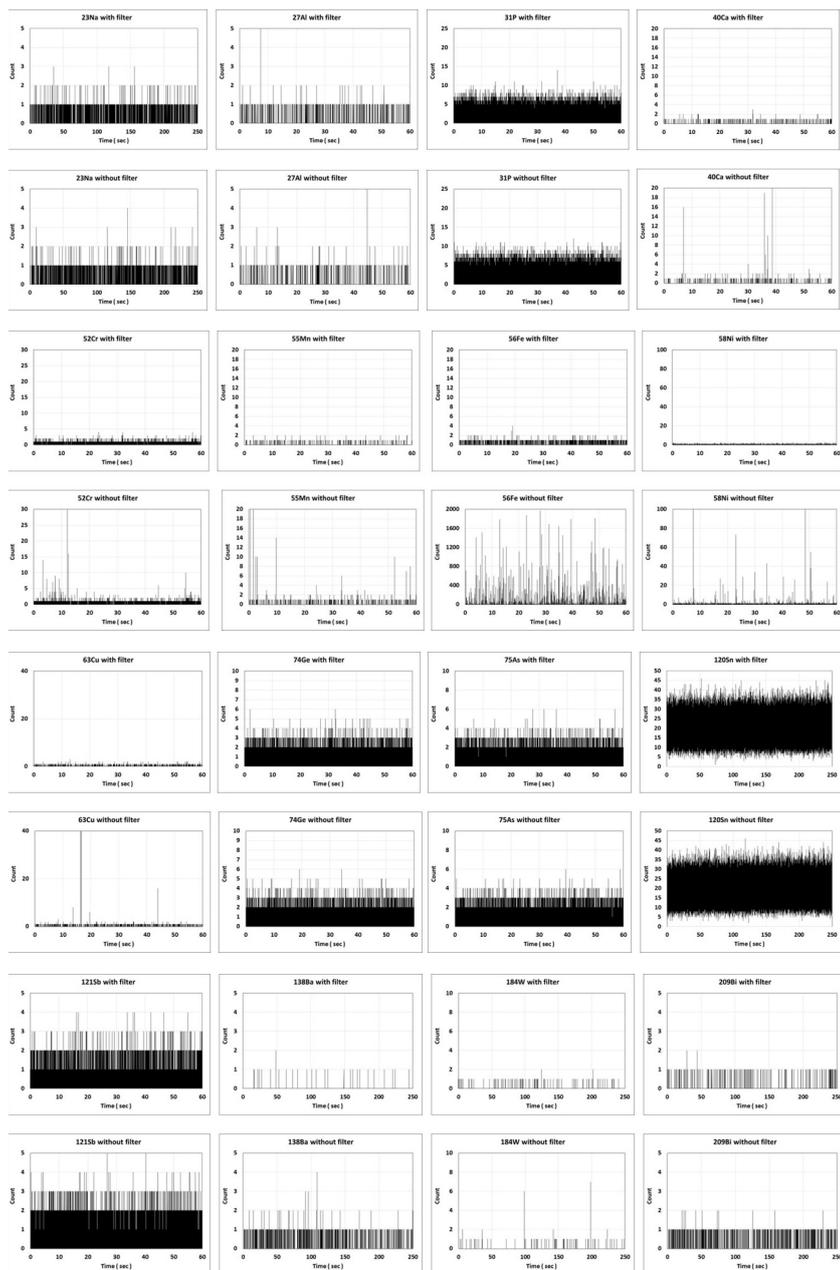


図 5. GED-ICP-MS を spICP-MS モードで使用し、フィルタがある場合とない場合での Cl₂ ガス中の元素の過渡信号

表 4 に、Cl₂ ガス中のガス状金属と粒子状不純物の概要を示します。直接ガス分析では、揮発性塩素化合物を形成する、比較的高い濃度の P、Fe、Cu、Ge、As、Sn、および Sb が示されました。GED-spICP-MS 分析では、いくつかの粒子状不純物がかなり低い濃度レベルで検出されました。

表 4. スペクトルモードの直接ガス ICP-MS 分析で得られたガス状不純物データ、および GED-ICP-MS の単一粒子分析モードで得られた粒子を示す、Cl₂ ガス分析結果の概要

分析対象物	Q1 質量数	Q2 質量数	ガス状不純物						粒子	
			積分時間 (s)	Ar ガス		Cl ₂ ガス		ブランク補正濃度 (µg/kg)	Cl ₂ ガス	
				感度係数 (ag/count)	濃度 (µg/kg)	感度係数 (ag/count)	濃度 (µg/kg)		積分時間 (s)	濃度 (ng/kg)
Li	7	7	0.45	60	0.000	47	0.002	0.003	250	N.D.
Na	23	23	0.45	22	< 0.003	18	0.01	0.009	250	0.001
Mg	24	24	0.45	37	0.000	36	0.000	N.D.	250	N.D.
Al	27	27	0.45	32	0.008	44	0.01	0.002	60	N.D.
P	31	47	0.45	363	161	431	941	780	60	N.D.
K	39	39	0.45	18	0.02	24	0.02	N.D.	60	N.D.
Ca	40	40	0.45	22	0.007	26	0.003	N.D.	60	0.001
Ti	48	64	0.45	28	< 0.002	31	0.000	N.D.	60	N.D.
V	51	51	0.45	25	0.000	41	0.1	0.1	60	N.D.
Cr	52	52	0.45	20	0.5	36	1	0.8	60	0.002
Mn	55	55	0.45	12	< 0.002	26	< 0.001	N.D.	60	0.004
Fe	56	56	0.45	15	0.02	33	21	21	60	2.3
Ni	58	58	0.45	34	0.05	71	0.2	0.2	60	0.036
Co	59	59	0.45	16	< 0.001	18	0.000	N.D.	60	N.D.
Cu	63	63	0.45	36	0.02	86	3	3	60	0.006
Zn	66	66	0.45	92	0.000	310	0.3	0.3	60	N.D.
Ga	69	69	0.45	17	0.000	35	0.03	0.03	60	N.D.
Ge	74	74	0.45	21	0.02	70	3	3	60	N.D.
As	75	91	0.45	271	< 0.1	791	43	43	60	N.D.
Sr	88	88	0.45	11	< 0.001	12	0.000	N.D.	60	N.D.
Zr	90	106	0.45	20	< 0.005	22	0.000	N.D.	60	N.D.
Mo	98	98	0.45	55	< 0.007	82	< 0.05	N.D.	60	N.D.
Ag	107	107	0.45	23	< 0.003	26	0.000	N.D.	60	N.D.
Cd	111	111	0.45	32	< 0.004	35	0.000	N.D.	250	N.D.
Sn	120	120	0.45	35	1	38	60	59	250	0.21
Sb	121	121	0.45	37	0.07	43	2	2	60	0.24
Ba	138	138	0.45	13	< 0.001	14	< 0.001	N.D.	250	0.002
W	184	184	0.45	32	< 0.004	29	0.000	N.D.	250	N.D.
Pb	208	208	0.45	18	< 0.002	17	0.000	N.D.	60	N.D.

結論

GED-MSAG-ICP-MS を使用して、半導体産業で使用されるガス中のガス状金属不純物および微粒子を分析しました。特殊ガス中の金属不純物の総レベルの評価は、IC の小型化、高速化、エネルギーの効率化に伴って、重要性が増しているアプリケーションです。

HF および Cl₂ などの腐食性ガスを取り扱うために、電解研磨されたステンレスセルに囲まれたメンブレンを GED に装着しました。デュアルシリンジ MSAG により、濃度が制御された酸ブランクおよび多元素標準液を導入することによって、MSA と Agilent 8900 ICP-QQQ を使用して自動で検量線を作成しました。

MS/MS を使用した高感度、低バックグラウンド、および干渉物の効果的な抑制により、8900 ICP-QQQ で溶解したガス状汚染元素と低濃度でガス中にあるナノ粒子の両方をモニタリングすることができます。

8900 ICP-QQQ を単一粒子 (sp) -ICP-MS モードで 1 ms のドwellタイムを使用して操作し、GED-MSAG-ICP-MS 技法で、HF および Cl₂ ガス中のさまざまな金属粒子を検出しました。GED メンブレン中に失われたガス状金属不純物の分析では、HF および Cl₂ が Ar 希釈ガスを介して ICP-QQQ のプラズマに直接 (GEDなし) 導入されました。データはスペクトルモードで取得され、その結果はガス中で検出されたガス状の金属不純物の範囲を示しました。

また、GED-MSAG-ICP-MS 手法は、NH₃、CO₂、HCl、NF₃、SiH₂Cl₂、および SF₆ を含む半導体業界が注目する他の特殊ガスのテストにも使用できます。

警告 化学物質の危険性

本メソッドは使用に関連付けられる安全上の問題に対処するものではありません。分析者の責任において、可能な限り適切な個人用保護具を使用し、可能な限り適切な安全手順に従ってください。

ホームページ

www.agilent.com/chem/jp

カスタムコンタクトセンター

0120-477-111

email_japan@agilent.com

本製品は一般的な実験用途での使用を想定しており、医薬品医療機器等法に基づく登録を行っていません。本文書に記載の情報、説明、製品仕様等は予告なしに変更されることがあります。

DE34987855

アジレント・テクノロジー株式会社

© Agilent Technologies, Inc. 2022

Printed in Japan, December 8, 2022

5994-5321JAJP

参考文献

1. Measuring Inorganic Impurities in Semiconductor Manufacturing, Agilent publication, [5991-9495EN](#)
2. Kohei Nishiguchi et al., Real-time multielement monitoring of airborne particulate matter using ICP-MS instrument equipped with gas converter apparatus, J. Anal. At.Spectrom., **2008**, 23, 1125–1129
3. Robert Kovacs et al., Development of direct atmospheric sampling for laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, J. Anal. At.Spectrom., **2010**, 25, 142–147
4. Yoshinari Suzuki et al., Real-time monitoring and determination of Pb in a single airborne nanoparticle, J. Anal. At.Spectrom., **2010**, 25, 947–949
5. S.-L. von der Weiden et al., Particle loss calculator – a new software tool for the assessment of the performance of aerosol inlet systems, Atoms. Meas. Tech. Discuss., 2, **2009**, 1099–1141
6. Yoshinori Shimamura, Donna Hsu, and Michiko Yamanaka, spICP-QQQ による半導体プロセス試薬の多元素ナノ粒子分析, Agilent publication, [5994-0987JAJP](#)
7. Donna Hsu, Yoshinori Shimamura, Brian Liao, Michiko Yamanaka, Chun-Hua Chen, Chiu-Hun Su, and Ching Heng Hsu, Analysis of Nanoparticles in Organic Reagents by Agilent 8900 ICP-QQQ in spICP-MS Mode, Agilent publication, [5994-1306EN](#)