

第 13 章 WG11 歩留向上

13-1 はじめに

半導体製造プロセスにおいては、歩留はウェーハ上に作製された集積回路の機能性および信頼性で表現される。YE(歩留向上)は、研究開発段階での低い歩留を量産時の習熟歩留にまで上昇させる改善を指す。YE 章では、DRAM、MPU、Flash および SOC を高歩留で生産するために、現在および将来に要求される事項を示す。さらに、その中で困難な技術課題が何であるかを明らかにし、それらに対する実現可能な解決策について議論する。

YE 章は YMDB(歩留モデルと装置許容欠陥数)、DDC(欠陥検出と特徴付け)、WECC(ウェーハ環境汚染制御)の3つの技術領域で構成されている。YE 全体の統括はヨーロッパであるが、各技術領域においては YMDB は日本、DDC、WECC はアメリカがそれぞれリーダーとなり進めている。

集積回路の製造工程において、歩留低下は、例えば欠陥、不良、プロセス変動、および設計により引き起こされる。歩留低下を引き起こす汚染、機構には、環境中もしくは装置内で発生した気中分子状汚染(AMC)または、無機および有機のパーティクル、プロセス中で発生するパーティクル、欠陥、重ね合わせ不良、およびストレスなどがある。

今年度の国際活動は、年 2 回の ITRS 定例会議(第 34 回/2009 年 7 月米国サンフランシスコ、第 35 回/2009 年 12 月台湾)へ代表者が参加して議論し、特に WECC 純水中金属の付着に関する議論の成果を ITRS2009 年版の改訂に反映させた。

国内活動としては、NVD(Non-visual defect)をテーマに取り上げナノパーティクルの生成メカニズム(分子の粒子化)や制御方法、計測方法、故障診断などに関して国内専門家からの最新技術と技術動向のヒアリングを行った。

2010 年度から休止に入るが、引き続き ITRS 定例会議に参加し情報収集と改訂にかかわる議論を進めていく予定である。

13-2 ITRS2009 版改定のポイント

ITRS のYE章は先に示したようにその技術領域により大きく3つの節に分けられている。YMDBで内容の変更点は無いが、2008年度Update版からTable YE3 Yield Model and Defect Budget MPU Technology RequirementsおよびTable YE5 Yield Model and Defect Budget DRAM/Flash Technology Requirementsの2つのTableが削除された。これに伴い、以降のDDCおよびWECC関係のTable番号が2つずつ繰上げられた。DDCでは2008年度版で不十分であった箇所の修正がなされた。WECCでは純水中のパーティクルおよびメタルに関して日米欧で議論した。メタルに関して日本側からFMEA的手法を提案しCritical metalsとMetalsに分類し2009年度版の改訂に寄与した。

13-2-1 YMDB 改定

内容の変更点は無いが、2008 年度 Update 版から Table YE3 Yield Model and Defect Budget MPU Technology Requirements および Table YE5 Yield Model and Defect Budget DRAM/Flash Technology Requirements の 2 つの Table が削除された。

13-2-2 DDC 改定

Table について、数値等は内容について大きな変更は無いが、各年度における達成状況(色で分類)がアップデートされた。2008 年度 Update 版で不完全だった Table は修正された。

Difficult Challenges では言葉の表現など細かな修正がある。16nm 以上世代で HARI(High Aspect Ratio

Inspection)が 3D Inspection 表現となり、対象が Non Visible Defect を含む様に拡張された。16nm 未満世代では SMLY(Systematic Mechanisms Limited Yield) が Non-Visual Defects and Process Variations 表現となった。また 450mm 検査への準備についての記載が追加された。

13-2-3 WECC 改定

13-2-3-1 AMC (Airbone Molecular Contaminants)

Table YE7 (WECC)の AMC 関係で、Gate/Furnace エリアの気中メタルの定義に加えてウェーハ表面のメタル定義が追加された。Cu エリアにおける H₂S 許容濃度変化はないが、トータルのイオウ化合物の値が厳しくなった。レチクル環境の酸と塩基の値が改定された。リソエリアに比較して 10 倍厳しい値となっている (Table YE7 から AMC 関係改定部分を抜粋して図表 13-1 に示す)。

Year of Production		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<i>Gate/Furnace area wafer environment (cleanroom/POD/FOUP ambient)</i>									
Total metals [8]		1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Add	Total surface metals on wafers, 1e10 atoms/cm2/day	2	0.5						
	<i>Exposed Copper Wafer Environment (Cleanroom/POD/FOUP ambient)</i>								
Was	H2S	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	Total sulphur compounds	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Is		2500							
<i>Reticle Exposure (Cleanroom/POD/Box ambient)</i>									
Was	Total Inorganic Acids	500	TBD						
Is		500							
Was	Total bases	2500	TBD						
Is		5000							

図表 13-1 WECC/AMC 改定概要

13-2-3-2 Ultrapure Water

Table YE7 の超純水部分でコロイダルシリカの項目が追加されたが値は TBD となっている。日本から FEMA 的手法によるメタル元素分類を提案し、Critical metals の他に Metals の項目を追加して、それぞれ 1 ppt, 10 ppt と数値を定めた。Table YE7 から超純水中金属不純物部分を抜粋して図表 13-2 にまとめる。Ag, Au, Ca, Cu, Fe, Na, Ni, Pt を Critical metals、Al, Ba, Co, Cr, Ga, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Sr, Ti, Zn を Metals と分類した。本改定の目的、経緯等については 13-4 項 WECC Topics で詳細に述べる。

Year of Production	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Flash 1/2 Pitch (nm)	36	32	28	25	23	20	18	16	14	13	11
DRAM 1/2 Pitch (nm)	45	40	36	32	28	25	23	20	18	16	14
2008 update	Critical metals (ppt, each) [6]	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
↓	[6] Critical metals and ions may include: Al, As, Ba, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn.										
2009 edition	Critical metals (ppt, each) (Ag, Au, Ca, Cu, Fe, Na, Ni, Pt)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
2009 edition	Metals (ppt each) (Al, Ba, Co, Cr, Ga, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Sr, Ti, Zn)	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10

図表 13-2 WECC/UPW 改定概要

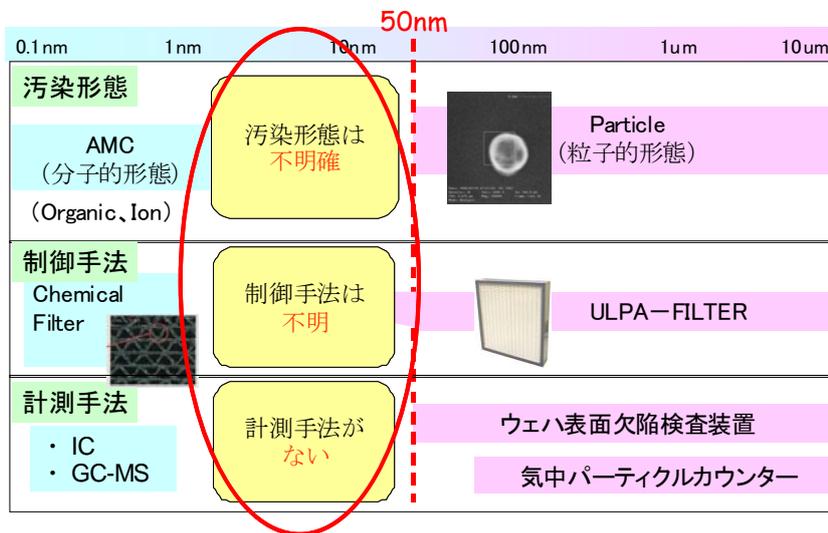
13-3 YE Topics～Non-visual defect & Contamination への挑戦

Difficult Challenges に記載されている Non-visual defect の重要性が増す中、『Non-visual defect & Contamination への挑戦』をテーマに活動を行ってきた。狙いとするところは、汚染・欠陥が見える化し、デバイスへの影響を論理的に解明するとともにこれらを確実に制御することでデバイス性能や歩留まりの向上を目指すことである。現状までの取り組みとしては以下の 3 点である。

- ① 検出が極めて困難である分子レベルあるいはそれに近い微細物質のデバイスへの影響が顕在化してきており、これらの物質自身やそれらが大気中やロードロック室などで反応してデバイスへ悪影響を及ぼすようになる。これらの生成メカニズムを明確化する。(WECC 的視点)
 - ② 直接測定による検出が極めて困難である微細物質やチャージアップ等を、間接的な手法で検出する手法の調査を行う。(DDC 的視点)
 - ③ 最終的には NVD を電気的特性により検出する。(YMDB 的視点)
- 以下、個別に説明する。

13-3-1 50nm 以下パーティクルの制御技術(WECC)

微細化に伴い制御すべきパーティクルのサイズはますます小さくなってきているが、従来手法による制御では対応できなくなっていると考えられる。そこで微小パーティクルに対する STRJ の活動として 50nm 以下のパーティクルの制御について検討を行った。図表 13-3 に 50nm 以下の粒子に関する現状を示す。計測手法や制御手法は 50nm 程度以上の粒子や、数 nm 以下のガス状の物質においては確立されているが、その中間の数 nm～50nm 程度の領域においては、計測や制御や汚染の形態に関してよく分かっていないというのが現状である。すでに現在 32～28nm デバイスが試作されている点からも、この未知の領域の解明が必須になっていると考えられる。

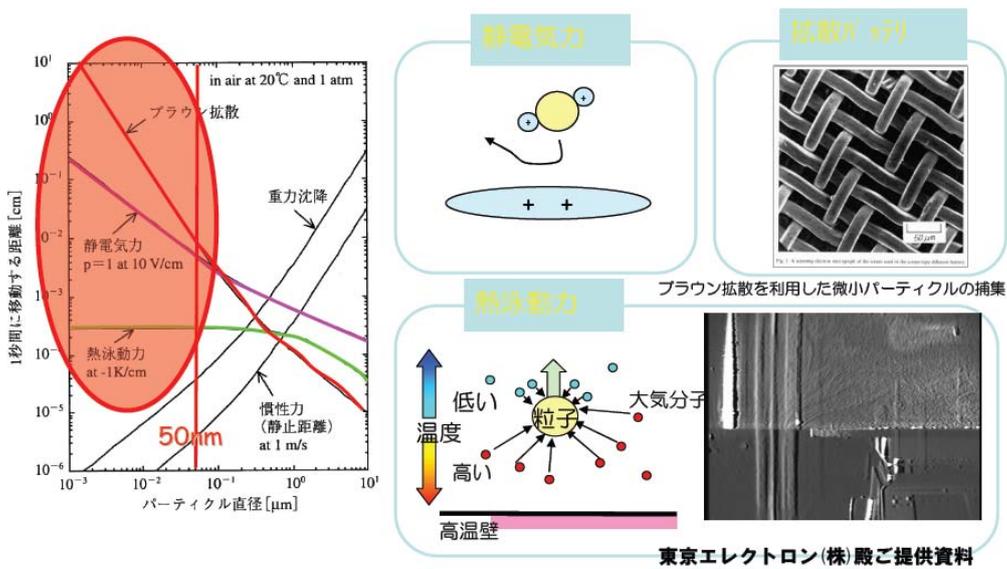


図表 13-3 50nm 以下パーティクルの現状

図表 13-4 は 50nm 以下の微小パーティクルに対して働く支配的な力を示したものである。50nm 以下の粒子においては重力や慣性力よりも、ブラウン拡散や静電気、熱泳動などによる移動が支配的になっていくことが分かる。従来からミニエンバイロメントを作製することでパーティクル汚染防止を行っていたが、パーティクルのサイズが微小になるほど、ブラウン拡散、静電気、熱泳動などの力によってミニエンバイロメントの清浄度の維持は困難になっていくものと考えられる。

今後はこれらの微小パーティクルに対して有効な 3 つの効果を理論的に解釈し、原理原則に基づく積極的な

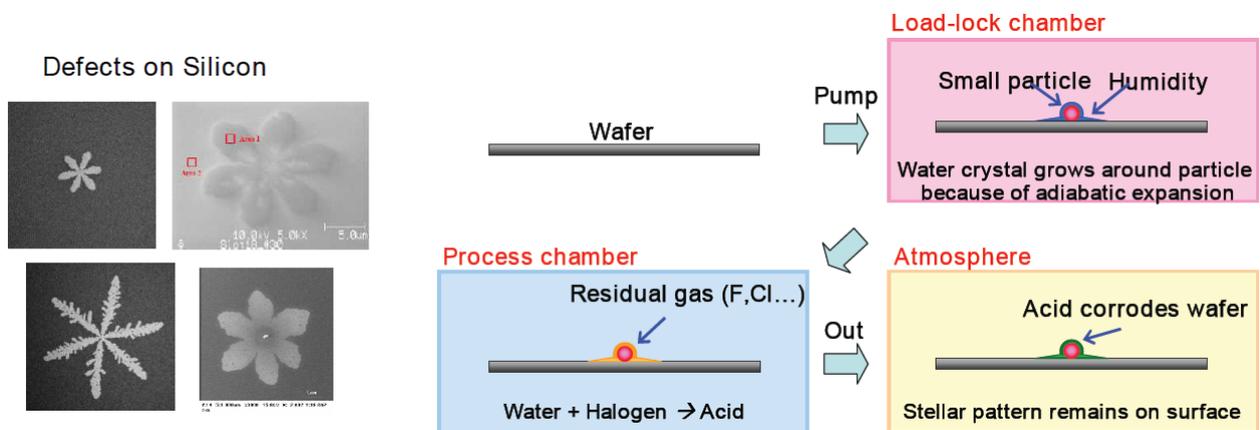
制御手法の開発が必要になっていくと考えられる。



図表 13-4 50nm 以下パーティクル制御技術

図表 13-5 にパーティクルを核とした水分子が粒子化した SEM 画像とその発生モデルを示す。発生メカニズムとしては、ウェハ表面上や大気から持ち込まれた水分が真空引きに伴う断熱膨張により、冷却された基板上の微小パーティクルを核とした氷状結晶が生成された後に、残ガスなどにより顕在化したものと考えられる。

発生条件や制御手法などの調査途上ではあるが、今後はウェハ上水分、大気中水分なども、歩留まり向上のために検討していく項目になるものと考えられる。



図表 13-5 微小パーティクルの顕在化事例 (パーティクルを核とした水分子の粒子化現象)

13-3-2 マスクヘイズ生成～光照射によるナノ粒子生成(WECC)

分子のナノパーティクル化の事例を挙げる。ArF 露光で近年、マスクへのヘイズが顕在化している。現状の課題としてヘイズ発生メカニズムを解明しその発生を抑制する必要がある。マスクの洗浄方法の検討、保管環境スペックの算定、ペリクル等の構成機材の低アウトガス化がその施策として挙げられる。マスクヘイズには以下に示す三種類のモードがある。

① 硫安系ヘイズ

KrF, ArF 露光で発生するヘイズである。結晶質、非結晶質がある。露光量(使用期間)の増加に伴い発生

頻度が多くなる。原因としてマスク洗浄時の洗浄液の残留成分やウェーハの露光、保管環境のアンモニアと硫酸が考えられる。マスク低減とウェーハ露光、保管環境の改善が必要である。

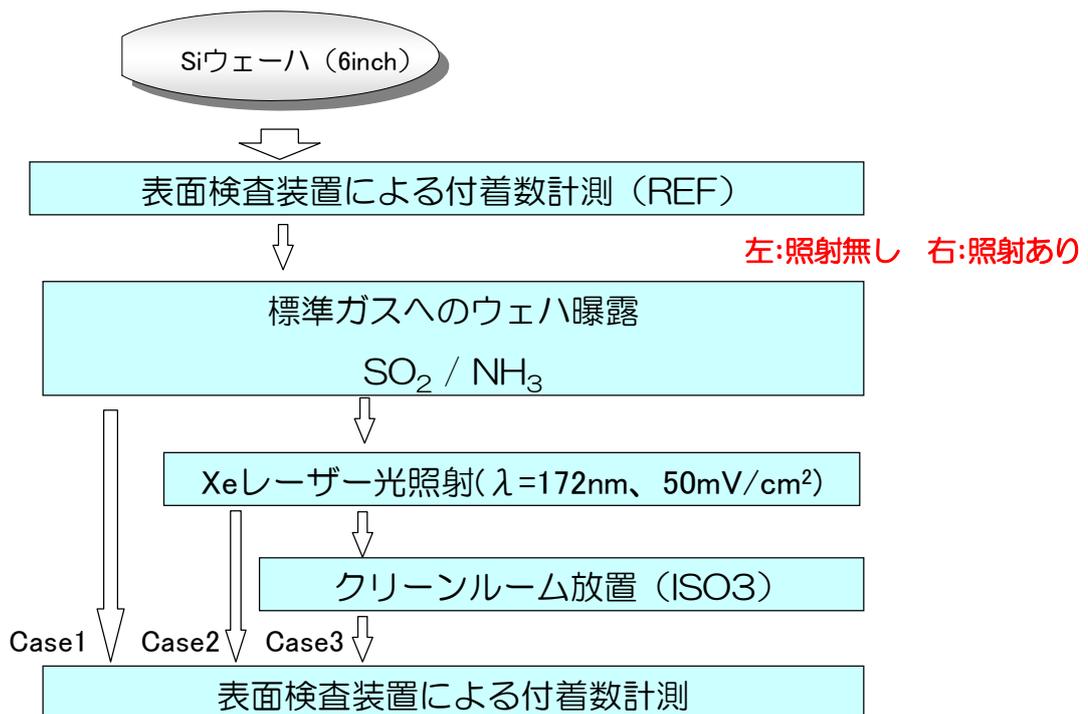
② 有機系ヘイズ

ArF 露光のみで発生するヘイズで微細異物がパターン面上に多発する。発生原因としてペリクルおよび保管ケースからの有機系ガス、ウェーハの露光、保管環境からの有機系ガスが考えられる。ペリクルおよび保管ケース、ウェーハ露光、保管環境からの有機ガスの低減が必要である。

③ シュウ酸ヘイズ

KrF ペリクルで発生するヘイズである。大きな結晶異物がペリクル膜上に発生する。ウェーハの露光環境中のシュウ酸が主原因である。このシュウ酸の低減化によりヘイズの発生はなくなる。現在ではこのシュウ酸ヘイズの問題はほぼ解決されてきている。

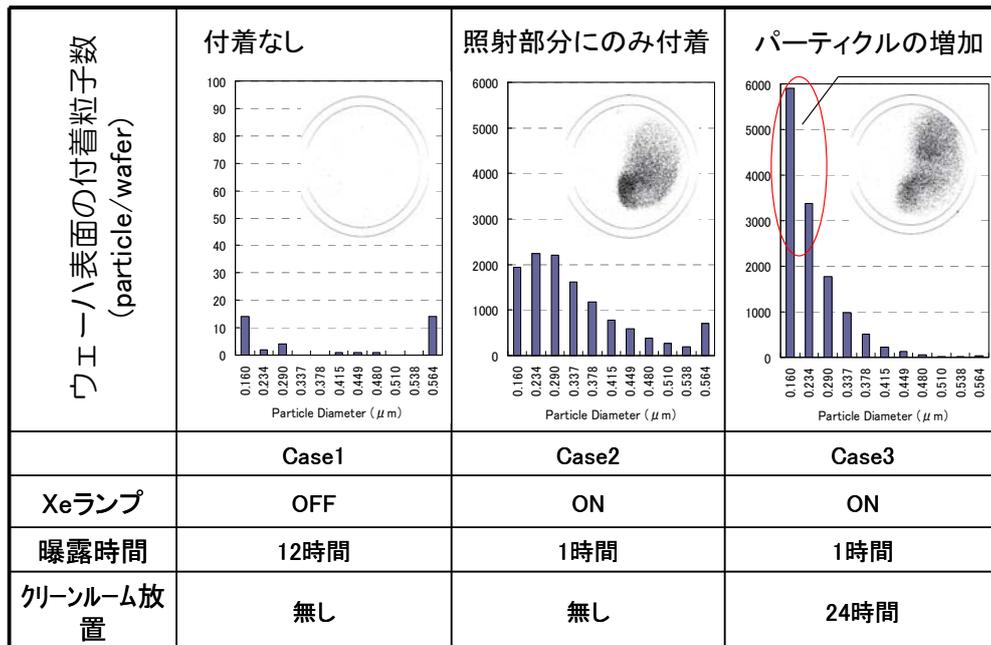
この中で硫酸系ヘイズのメカニズム解明のためにシリコンウェーハをマスクに見立てた以下の評価結果を示す。図表 13-6 は実験のフローである。清浄なシリコンウェーハを用意して表面検査装置による付着数を計測してリファレンスとする。その後、NH₃とSO₂の標準ガスを流しウェーハを暴露する。同時にXeランプ(172nm)をケース2,3に照射する。その際ウェーハの半分はアルミ箔で被い照射されないようにする。Xeランプ照射無しのケース1では暴露は12時間でケース2,3は1時間としている。ケース3はその後クリーンルーム内に24時間放置する。各水準のウェーハ表面の付着粒子数を計測しヘイズ発生の有無を評価する。



(株)竹中工務店殿ご提供資料

図表 13-6 光照射によるナノ粒子生成実験フロー

図表 13-7 に実験結果を示す。ケース1のXeランプ照射無しの水準では標準ガス成分は分子として存在し粒子化はしない。それに対してケース2,3はXeランプ照射した部分のみパーティクルが検出される。Xeランプのエネルギーによって粒子化したと推定できる。さらにクリーンルームに放置すると粒子化が進むことがわかる(ケース3)。アンモニアガス、SO₂ガスが存在した場合に光照射により粒子化して硫酸ヘイズを引き起こすと推定される。マスクの保管環境における雰囲気ガスの清浄化は重要である。



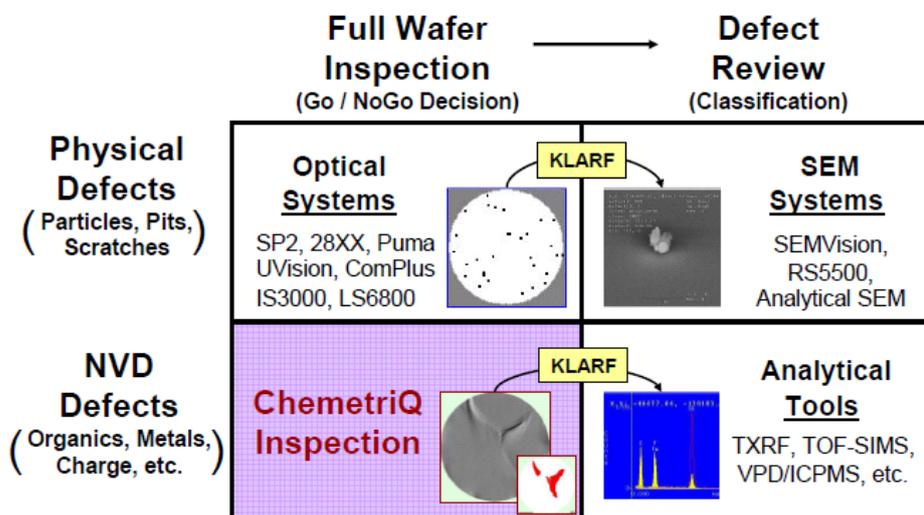
図表 13-7 各水準におけるウェーハ表面付着粒子数 (株)竹中工務店殿ご提供資料

13-3-3 Non-Visual Defect の見える化 (DDC)

Non-Visual Defect(NVD)は、微細化の進行に伴い増加傾向にあるが、現在その定義もまだ確立されたものはない。NVDと呼ばれているものは以下のようなものがあると考える。

1. 汚染起因の欠陥(金属/有機汚染、プラズマダメージ、チャージアップなど)
2. 埋もれた欠陥(ボイド、非導通など)
3. HAR(High Aspect Ratio)構造の Line & Space パターン底のブリッジやコンタクトホール底の欠陥
4. リーク系(結晶欠陥、インプラエラー、NiSi パイピングなど)や高抵抗系の欠陥
5. 極微小のため現在の検査技術では検出できない欠陥

異物やスクラッチなどの物理欠陥は、図表 13-8 の上段に示すように、光学的な検査手法で検出したものを SEM などの高倍率観察が可能なツールでレビューし、欠陥の分類や解析を行っていた。しかし、上記のような NVD はこの手法では可視化不可能である。今後は下段に示すように何らかの NVD 検出手法を用いてその存在を顕在化し、検出した領域を何らかの分析手法を用いて元素や組成、周囲とは異なる現象、挙動を見せる原因を明らかにしていく必要がある。



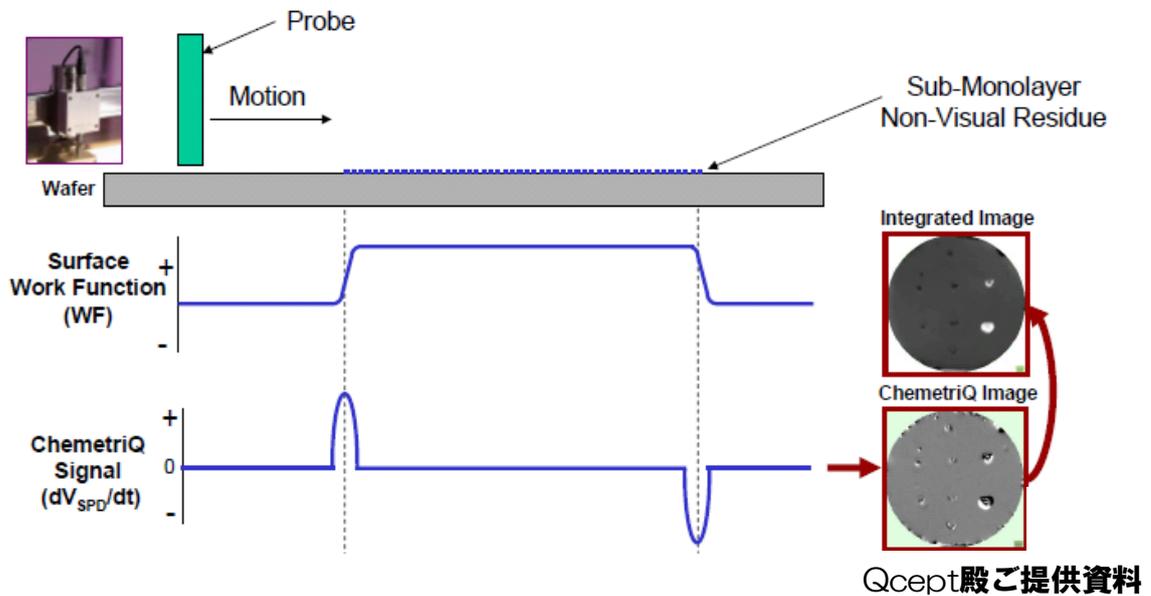
図表 13-8 物理欠陥とNVD の検出、解析手法の比較 Qcept殿ご提供資料

これらの NVD の可視化、顕在化手法は、様々な取り組みが行われており、以下にその一例を示す。

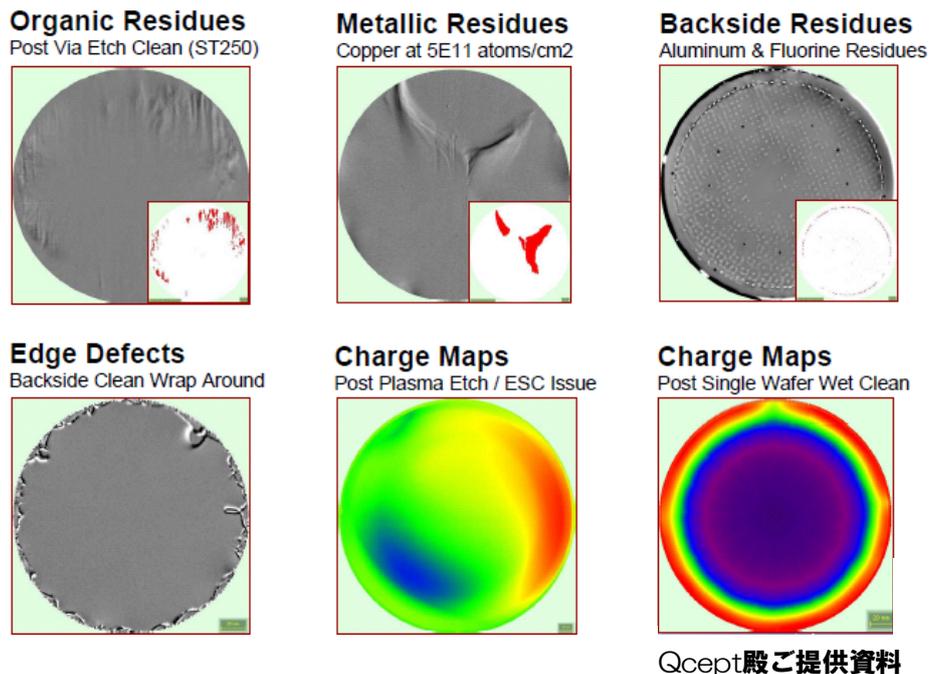
図表 13-9 はその原理図を示したものである。プローブを用いてウェーハ全面をスキャンし、表面ポテンシャルの変化を検出する。検出結果を処理してウェーハ内の表面ポテンシャルの状態をマッピングする。ウェーハ全面を数分でスキャンできるため、高速な評価が可能になる。

図表 13-10 に検出事例を示す。有機汚染、金属汚染、チェージアップなどの検出事例となっているが、表面ポテンシャルの違いを可視化した結果であり、実際に何を検出しているかは今後検証していく必要がある。原因により、検証方法も異なると考えられるため、検出手法と検証手法、その最適な組み合わせを検討していく必要がある。また、これらで検出した欠陥が歩留やデバイス特性とどのような相関を持つのかも検証が必要である。

このように「NVD の見える化」については課題が多く、これからの技術開発とその方向性の明確化が重要となってくる。



図表 13-9 表面ポテンシャル可視化の原理

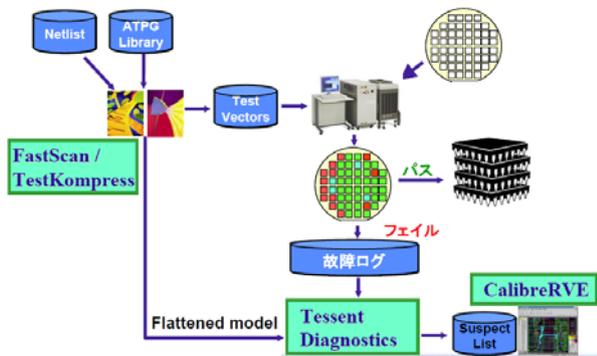


図表 13-10 NVD の検出事例

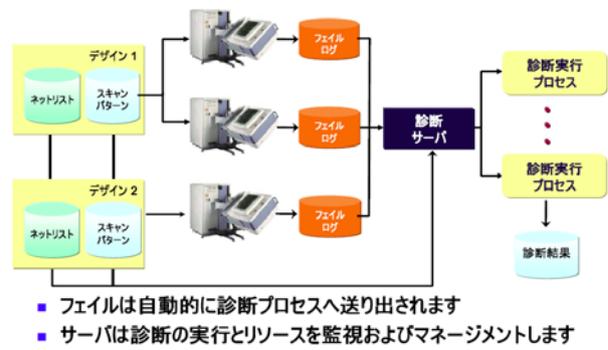
13-3-4 NVDと故障診断システム (YMDB)

歩留向上では、プロセスレイアウト設計から期待されるチップ上の形状プロファイルと、実際に製造工程で作出された実物との差異について、通常の製造ばらつきの範囲を超えるものを Defect として捉える。Defect は、その構造から Missing-Material 若しくは Extra-Material に大別され、またウェハテスト時にチップを不良に至らしめる Fault と、単なる物理形状プロファイル上での異常に留まるものに区別される。前者は、一般にキラー欠陥と呼ばれるが、その中で同時に NVD でもあるものを、以下では特に Non Visual Fault(NVF)と呼ぶ。NVD に於いては、実際にチップの歩留低下を引き起こす NVF を捕捉し、その物理解析によって得られる知見により検出が求められる物理的異常の内容を明らかにし、その可観測性及び他異常との分離性をインラインの検査工程に組み込む事が求められる。NVD 起因の信頼性問題に対しても、ほぼ同様のアプローチでの対応が可能である。

以下で説明する故障診断システムは、該手順実施の過程で必要となるウェハ/チップ中の NVF の位置特定に有効な Tool であり、複数の IDM がシステム開発/導入している。



図表 13-11 故障診断システム



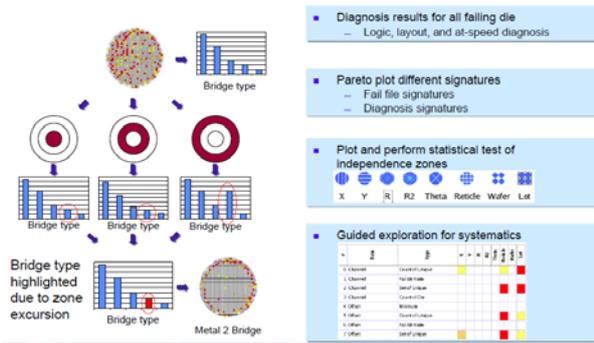
図表 13-12 Volume Diag.

13-3-4-1 故障診断システム

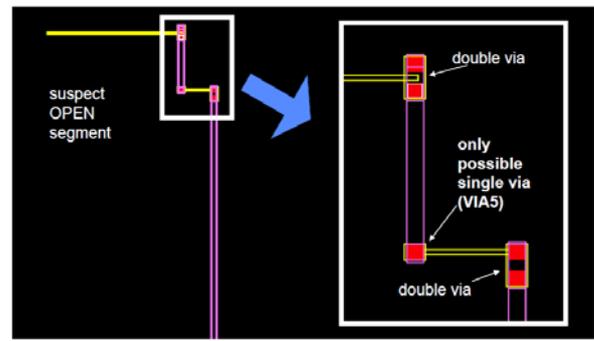
図表 13-11に故障診断システムの構成例を示す。故障診断システムは一般にテストパターン生成システム(ATPG)と一体化されており、設計データ/テストパターン/テスト結果を用いて、テストで不良と判定されたチップに対して、その原因となった内部の誤動作素子を推定する機能を有している(図表 13-11 の Tessent Diagnostics)。この推定は、外観検査結果等の他から入力を全く使用せずに実行される論理的な作業である。また、得られた故障診断結果とレイアウト設計データをリンクさせる事により、該誤動作素子のレイアウト上での位置を表示可能なシステムが、開発(図表 13-11 の CalibreRVE)されている。

13-3-4-2 Volume Diag. 大規模故障診断データ収集システム

図表 13-12 は、Volume Diag.と呼ばれる大規模故障診断データ収集システムの構成例である。該診断システムが主対象とするのはウェハテストに於ける低歩留問題で、プロセス変動マージンが狭い IP が高不良率を示す様な設計系要因 NVF の他に、例えば特定配線層での配線間ショート増加の様な不良 IP が特定出来ないプロセス系要因による歩留低下等も含まれる。故障診断中の診断実行プロセスは、計算リソースを多く必要とするので、短リードタイムで十分な量の診断結果を得る為に図の様な並列処理化等が検討されており、市場不良品の原因究明を目的としたシステムとは、システム構成が異なる。



図表 13-13 歩留管理システム



図表 13-11 Design Intent 活用

13-3-4-3 歩留管理システムとの連携

図表 13-13 は、歩留管理システムによるゾーン解析結果と Volume Diag.による故障モード分類を組み合わせる事により、通常の統計解析ではランダム欠陥の中に埋もれて発見されない様なレベルのシステムティック不良を発見した例である。図表 13-13 では、ウェハ外周部分で特定の Bridge 不良の発生頻度が、明らかに高い事が示されている。該不良モードの存在を認識出来れば、解析対象チップを選定する事によって不良原因を解析可能となる。この種の統計的に埋もれ易い不良も、広い意味で NVF と考える事が出来る。Volume Diag.の実施結果として得られる故障内容の詳細データは、外観検査結果における ADC 結果等と同様に、不良モードを区別する為のインデックスとして活用が可能であり、歩留管理システムが従来持っていた統計処理の範囲を拡張する。

13-3-4-4 Design Intent の活用

図表 13-14 は、Open 故障が推定される節点のレイアウトデータから、Double Via による該接続の不良率低下を考慮する事によって、Open 故障発生の可能性が高い部分を絞り込んだ事例を示している。故障診断システムによる解析は、基本的に異常動作している電氣的節点を特定するものであり、例えばそれが複数の配線層を行き来する等電位配線中に発生したオープン不良であった場合、その中の不良発生箇所を物理的に絞り込むのは困難である。生産ラインの配線/Via 等の不良率を予め TEG 等で個別に把握しておく事により、設計時の目標歩留管理だけでなくウェハテスト不良チップの不良解析時に、等電位節点を構成する配線中の複数素子を不良発生の期待値が高いものから順位付ける事が可能となる。該順位付けにより、物理不良解析に要する工数の削減が期待出来る。

13-5 WECC Topics～ 純水中不純物についての議論

2009 年度の WECC 活動では、特に純水中の不純物を焦点に国内および日米欧三極で議論を重ねた。その中で金属不純物について日本側の提案が ITRS2009 年度版へ反映された。微粒子に関して米国から出されたモデルおよび Table YE7 記載内容には疑問点が多く、今後も国際的な議論を続ける必要がある。

13-5-1 WECC Topics-1 純水中の金属不純物

純水はウェットクリーニング、ウェットエッチング等の最終リンス液として大量に使用されている。そのためその純度は歩留を左右する重要な位置づけとなっている。特に金属不純物の濃度管理値に関して、日本側も入って議論が進み、2009 年度版で改訂があったので、その経緯について説明する。

ITRS2008 update Table YE9 で規定している純水中の Critical Metals は Al, As, Ba, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sn, Ti, Zn である。純水中のメタル濃度の基準は<1ppt(ng/L)である。2008 年より、米国・欧

州 WECC では、これをさらに細分化して Critical metals と Less Critical Metals にするべく、実験および議論を行っている。

2008 年度版までの YE-WECC でリストアップされている critical metals は FEP の critical metals との整合が取れていないため、ITRS 章間の整合を取った上で Table を改定するよう、日本の WECC から要求した。以下に示すように FEP ではウェハ上の金属汚染を三つに分類している。

1. Critical GOI surface metals: ⇒ Fe, Ca, Ba, Sr (<5e9atoms/cm²)
2. Critical other surface metals : ⇒ Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Hf, Pt (<1e10atoms/cm²)
3. Mobile ions: ⇒ Na, K, ..(2e12atoms/cm²)

両者に共通している金属は Ba, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, K, Na, Ni である。日本 WECC としては、FEP の Critical Metals, 純水中の存在確率、ウェハへの吸着確率を総合的に判断した WECC critical metals 表の日本案を作成し、これを 2009.3 ベルギー開催の ITRS 欧州会議で提案した(図表 13-15 参照)。

	FEP critical metals	Occurrence in UPW	Deposition probability	WECC critical metals in UPW
Ag	no	no	Low	no
Al	no	Yes	High	less critical
As	no	no	Unknown	Unknown
B	no	Yes	Unknown	Unknown
Ba	critical	seldom	Unknown	Unknown
Ca	critical	Yes	High	critical
Co	critical	seldom	Unknown	Unknown
Cr	critical	Yes	middle	critical
Cu	critical	seldom	Low	less critical
Fe	critical	Yes	High	critical
Ga	no	no	Unknown	Unknown
Ge	no	no	Unknown	Unknown
Hf	critical	no	Unknown	Unknown
K	mobile	Yes	middle	less critical
Li	no	no	Low	no
Mg	no	seldom	High	less critical
Mn	no	seldom	Unknown	Unknown
Na	mobile	Yes	middle	less critical
Ni	critical	Yes	middle	critical
Pt	critical	no	Unknown	Unknown
Sr	critical	no	Unknown	Unknown
Ti	no	seldom	Unknown	Unknown
Zn	no	Yes	High	less critical

Based on FEP table Based on hearing from UPW suppliers Based on experiments by US WECC WG

図表 13-15 純水中の critical metals の提案(2009.3_ITRS ベルギー会議)JWECC

その結果、ITRS では、この分類の考え方を踏まえて、さらに多くの金属元素も含めた表が作成された。これを図表 13-16 に示す。

FMEA Result Device Impact x Deposition Probability	2009 Roadmap Recommendation ppt	Metal	Device	Device	Typical UPW	Occurrence	Deposition	Deposition	Detection
			Impact	Weight	Concentration ppt	Risk	Concentration at Equilibrium 20C	Risk	Risk
1000	1	Ag	High	20	<0.5	2	3.2E+07	5	5
40	10	Al	Low	5	1	1	Note 1 & 2	8	1
1600	1	Au	High	20	<0.5	2	Note 2	8	5
5	50	B	Low	5	<5	1	No Data	1	1
25	10	Ba	Unknown	1	<0.1	1	Note 3	5	5
1120	1	Ca	High	20	<2	8	2.8E+08	7	1
200	1	Co	High	20	<0.5	2	Note 2	5	1
1200	1	Cr	Med to High	20	<1	5	3.3E+07	4	3
1800	1	Cu	High	20	<1	5	1.9E+08	6	3
900	1	Fe	High	20	<1	5	2.4E+07	9	1
20	10	Ga	Unknown	1	<0.5	1	Note 3	4	5
20	10	Ge	Unknown	1	<1	1	Note 3	4	5
40	10	Hf	Unknown	1		1	Note 2	8	5
25	10	K	Low	5	<1	1	Note 1 & 3	5	1
15	10	Li	Low	5	<0.1	1	Note 1 & 3	3	1
45	10	Mg	Low	5	<0.5	1	7.0E+08	9	1
4	10	Mn	Unknown	1	<1	1	Note 3	4	1
100	10	Mo	Low	5	<0.1	1	Note 3	4	5
400	1	Na	High	20	1	5	1.2E+08	4	1
400	1	Ni	High	20	<1	5	2.8E+07	4	1
3500	1	Pt	High	20	1	5	Note 2	7	5
30	10	Sr	Unknown	1	<0.1	1	Note 3	6	5
200	10	Ti	Low	5	<0.5	1	Note 2	8	5
40	10	Zn	Low	5	<1	1	Note 1 & 3	8	1

Note 1: Empirical data cannot measure deposition due to relatively high levels in control wafers, ie no difference between control and exposed
Note 2: Likely to deposit based on Pourbaix model
Note 3: Not likely to deposit based on Pourbaix model

図表 13-16 Metal Deposition from UPW FMEA

この結果は、ITRS2009 年度版の Table YE7 の純水中金属不純物の項に反映され、図表 13-2(前出)のように、Critical metals が 1ppt, Non-critical metals が 10ppt と分類された。元素分類は、Ag, Au, Ca, Cu, Fe, Na, Ni, Pt が Critical metals、Al, Ba, Co, Cr, Ga, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Sr, Ti, Zn が Non-critical metals となった。

13-5-2 純水からの微粒子汚染

2008 年度 Update 版において、純水中の微粒子への要求値が見直され、粒子径では 50nm が Critical Size へ、粒子数は 900 個/L から 100 個/L となり、粒径、粒子数ともに厳しくなった。しかし、設定値の妥当性についての検討・議論は必ずしも十分ではなく、昨年度末から今年度に欠けて米国、欧州および日本の WECC において、純水からの微粒子汚染について、付着機構および純水への要求値設定に向けた検討・議論を進めてきた。

米国、欧州でのデータ採取、検討により、純水からの微粒子汚染は次の 2 つの現象によるモデルからなることが提案されている。

- ① 拡散によって純水中の微粒子がウェーハ表面に接近して付着する。この際の付着率は 50% に設定。
- ② ウェーハ上に残留する純水が乾燥し、純水中の微粒子が残留・付着する。

この米国・欧州モデルに基づいた試算例として、0.2 μm の微粒子が 200 個/L 存在する純水中に 600 秒間ウェーハを浸漬すると、微粒子付着量は約 2,500 個/300mm ウェーハと計算された。この値は、実際の洗浄工程での微粒子汚染量と比較して、極めて大きな数値と言え、付着率の設定など検討の余地が残ると考えられた。

米国、欧州からの提案モデルでの試算結果が、実際の洗浄工程での微粒子汚染状況と乖離が大きいことから、STRJ での活動として、純水からの微粒子汚染に関する過去の実験例等を調査して、WECC 内部での議論を行った。

文献等調査の結果、純水からの微粒子付着に影響を与える因子として、微粒子の組成、粒径、濃度や純水の液性およびウェーハ表面状態など多くの項目があげられた。調査の結果から、対象粒径が 50nm 以下となる微小粒子に関しては、純水からの微粒子汚染データはほとんどないため、既存の研究事例をもとに純水中の微小粒子による影響を考察した。ウェーハ汚染に最も大きな影響を与える因子が「ウェーハおよび微粒子の表面と電位」であると考え、双方の電位が正/負となる場合が、ウェーハへの微粒子付着が最も進むと仮定し、この条件から、純水中に許容される微粒子数を試算した。参考文献¹⁾において、中性域での電位がプラスである窒化ケイ素(Si₃N₄)微粒子を用いて自然酸化膜付ウェーハ(電位はマイナス)への付着検討結果が示されており、この結果を参考に純水からの微粒子付着率(R)を以下の式(1)から算出した。

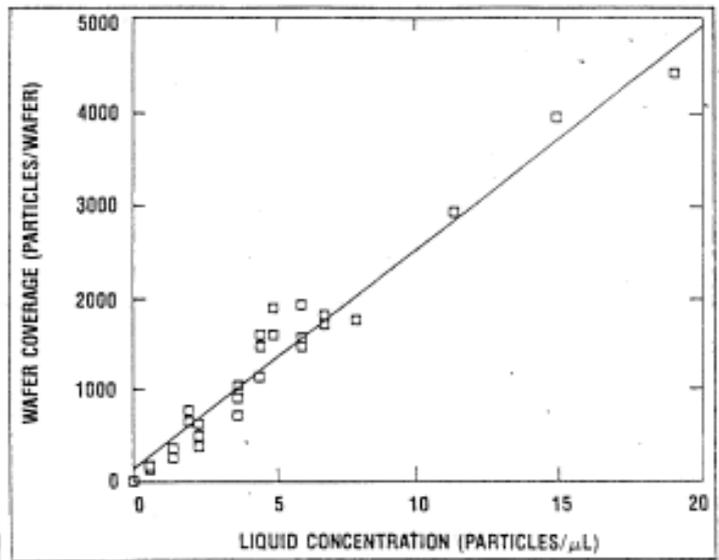


Figure 4: Wafer coverage measured following a 5-min submersion in various known liquid-bath concentrations of 0.1-3.0- μm silicon nitride particles.

図表 13-17 水中微粒子濃度とウェーハ付着量の関係¹⁾

$$R = \{Cwf / (Ch * Swf * 100 * Dw)\} * 100 \dots \text{式(1)}$$

R; 付着率(%)

Cwf; ウェーハ上の微粒子数

5,000 個/枚(図表 13-17 より)

Ch; 純水中微粒子数

7,000 個/mL(図表 13-17 より)

Swf100 ; 100mm ウェーハ表面積

78.5 cm²

Dw; 付着に寄与するウェーハ表面上の水層厚さ 1 cm

(1)式より、純水からの微粒子付着率は R=0.9% と算出された。

この結果より、更に、以下の式で純水中の許容微粒子濃度(Rq)を求めた。

$$Rq = Rqw / \{(R/100) * S25 * Swf300 * Dw * n\} \text{式(2)}$$

Rq ; 純水中許容濃度(個/mL)

Rqw; 表面上の微粒子許容濃 75.4 個/枚

(Table FEP3 より)

R ; 付着率(%) 0.9% (式(1)の結果より)

S25 ; 25nm 微粒子としたときの補正值 4(*1)

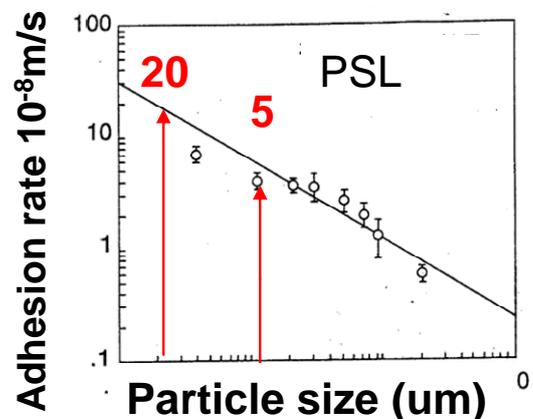
*1; 図表 13-17 は 0.1~3 μm の微粒子を対象としており、図表 13-18 より、0.1 μm に対して 0.025 μm の微粒子の付着量は 4 倍と読み取った。

Swf300; 300mm ウェーハ表面積

706 cm²

n ; 洗浄回数

5 回



図表 13-18 粒子径とウェーハ付着量の関係²⁾

(2)式より、純水中許容濃度(Rq)は、0.6 個/mL と算出された。

この試算結果をもとに、2009 年 7 月のサンフランシスコ国際会議において、50nm 以下の微細粒子を対象とした純水中の許容微粒子は 0.6 個/mL として提案した。米国、欧州の委員からは、考え方については理解を得られたが、上記計算結果では、微粒子が Si_3N_4 に限定されていることや、高濃度域でのデータであることなど、このまま要求値に反映させることは難しいとの見解であり、結果として、2009 年度版には反映されなかった。

純水への要求において、プロセスにとって必要となる水質を設定することが ITRS の趣旨である。しかしながら、現状、純水中の微粒子への要求値は妥当な議論がない中で極めて厳しく設定され、計測技術の確立なども含め課題が多い。本当に必要となる純水中の微粒子数を設定するために、実系に近いデータの採取・検討を継続していくことが必要である。

(参考文献)

- 1) Deborah J. Riley ら「Investigating liquid-based particle deposition and the effects of double-layer interactions using hydrophilic silicon wafers」, MICROCONTAMINATION December 1990
- 2) 齊藤他、「シリコンウェーハ表面のクリーン化技術 第 3 章 シリコンウェーハへのパーティクル付着メカニズム」、リアライズ社(2000)

13-6 WG11 2009 年度ヒアリング実績

以下に 2009 年度 STRJ WG11 のヒアリング実績を示す。今年度は Non-visual defect & Contamination に関連するヒアリングを中心に実施した。

1. 酸性ガスモニタ
徳島大学 竹内准教授
2. クリーンルームにおけるナノパーティクル生成に関する研究
株式会社竹中工務店
3. パーティクル対策の科学的アプローチ
東京エレクトロン株式会社
4. 歩留まり向上に貢献できる先端 DFT テクノロジー
メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社
5. 液中パーティクル計測技術
リオン株式会社
6. ChemetriQ® Inspection for Non-Visual Defect Detection
Qcept Technologies Inc.(代理店: プリミアテクノロジー株式会社)

2009 年度 WG11 活動に対して講演/資料提供等で御支援頂いた上記の皆様には感謝します。

13-7 まとめ

2009 年度の活動として、

1. NVD をテーマに取り上げ活動し、生成メカニズムや制御方法、計測方法、故障診断などの手法に関するヒアリングを行った。
2. 純水中金属の付着に関し FMEA 的手法を提案し WECC テーブルの改定に反映させた。

ロードマップ規格についてはまだまだ他極との議論を進める必要があり、NVD 生成メカニズムや制御方法、計測技術や診断技術などでは、今後も ITRS/STRJ を核として日本として情報を収集し、ヒアリングを通じてメン

バー間での議論を行い、他極にキャッチアップしていく必要がある。

以上