

第 14 章 WG11 歩留り向上

14-1 はじめに

今年度の国際活動としては、年3回の ITRS 定例会議(第 18 回/2004 年 4 月, イタリアStresa, 第 19 回/2004 年 7 月, 米国サンフランシスコ, 第 20 回/2004 年 12 月, 日本東京)への出席、並びに ITRS2004 年 update 版及び 2005 年版改定に向けた検討を進めた。ITRS の Yield Enhancement (YE)章はその技術領域により大きく4つの節に分けられており、日本(WG11)は歩留まりモデルと装置許容欠陥数(YMDB:Yield Model & Defect Budget)を担当し、ORTC 改訂に合わせて 2004 年 update 版の YMDB テーブルの改定を行っている。

国内活動としては、「YMDB(歩留まりモデルと装置許容欠陥数)」テーブルの見直しと、「DDC: Defect Detection & Characterization(欠陥検出と欠陥解析)」に関する議論、「WECC: Wafer Environmental Contamination Control(ウェーハ環境汚染制御)」に関する議論を進めた。特に、ここ数年 ITRS の Yield Enhancement TWG で活動が活発化してきたウェーハ環境汚染制御(WECC)に対する検討を日本国内でも本格化するため、新たに WG11 内に WECC サブ WG を発足させ ITRS での議論内容の詳細把握と日本側意見の集約を図った。活動内容については 2005 年 3 月の STRJ ワークショップにおいて報告しており、本報告書ではその内容をまとめた。

14-2 ITRS 2004 Update 版の主な改訂ポイント

ITRS の Yield Enhancement (YE)章はその技術領域により大きく4つの節に分けられているが、最も見直しが見えられたのがウェーハ環境汚染制御(WECC)である。欧米のデバイスメーカー、ファシリティメーカー、ガス・薬液メーカーからの委員が中心となって大幅にロードマップ項目が拡充された。但し、数値が未確定で TBD(今後決定)とされている部分も多い。歩留まりモデルと装置許容欠陥数(YMDB)に関しては、上述の通り WG11 にてテーブル改定を行った。歩留まりモデルに変更はなく ORTC 改訂に合わせてロードマップテーブルを改定している。欠陥検出と欠陥解析(DDC)では、短期的には相変わらず高アスペクト比パターン欠陥検査が大きな課題となっている。また、欠陥検査装置の COO 計算方法が改定された。一方、歩留習熟(YL:Yield Learning)に関しては改定作業が進まず 2003 年版と同じ内容にとどまっている。

14-3 国内活動：ウェーハ環境汚染制御(WECC)ロードマップの検討

2003 年度の活動の中で、欧米での活発な WECC サブ WG の活動が報告され、日本でもその重要性の認識が高まっていた。例えば、Table114 “Technology Requirements for Wafer Environmental Contamination Control” に記載されている要求項目数は ITRS2001 年度版が 29 項目であるのに対し、2003 年度版では 62 項目になり、さらに 2004 年度 update 版では 7 項目追加されている。このような決定は ITRS 定例会議でなされるが、WECC は YE に含まれていながら YE とは別に会議を開催するため、WECC サブ WG を持たない日本側としては、どのようなやり取りがなされロードマップが決定されているのか把握するのが困難であった。そこで、2004 年 10 月に日本においても WECC サブ WG を発足させ情報収集と、ロードマップ決定の議論に参画することとした。14-4 節では 2003 年度版および 2004 年 up date 版を調査した結果得られた問題点や疑問点を述べる。14-5 節ではウェーハを取り巻く環境の変化について述べ、14-6 節では今後の取り組みに関して述べる。

14-4 WECC ロードマップの問題点と疑問点

WECC の活動を始めるにあたり、まずこれまでのロードマップの内容及び他 TWG ロードマップとの整合性の精査を行った。その結果、何点かの問題点と疑問点が明らかになった。図表 14-1 にこれまでに議論してきた代表的な問題点を示す。

NECCロードマップ 2003年(2004年up date)版の問題点

1. 要求項目が大幅に増加したが、TBDも増え、数値根拠が不明
⇒薬液純度、メタルの3分類
2. FEPのウェーハ表面汚染制御の要求値と不一致
⇒気中Cu濃度/Siウェーハ上Cu濃度が不一致
3. プロセスパラメータが純度要求項目になっている
⇒UPW中の溶存窒素濃度(MS)
4. 実力値との乖離:バルクガス中不純物
⇒H2中のN2濃度:1ppbに対し、実力値は<0.01ppb
⇒H2O2中のメタル濃度:150pptに対し、実力値は<0.5ppt

ITRS2004東京meetingから議論開始

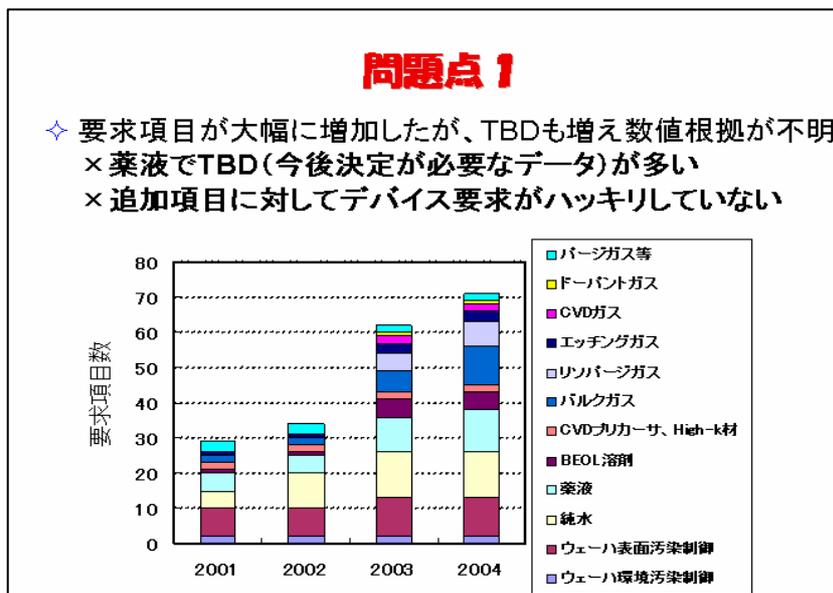
図表 14-1 2003 年(2004 年 update)版の問題点の概要

- 問題点 1: 要求項目や TBD が大幅に増加
- 問題点 2: フロントエンドプロセス(FEP) 要求項目との不統一
- 問題点 3: プロセスパラメータが要求項目
- 問題点 4: 実力値が要求値を既に凌駕

次に各問題点に関して、その内容と現状の対応を提案する。

14-4-1 問題点 1： 要求項目や TBD が大幅に増加

要求項目数とロードマップの改訂年を図表 14-2 に示す。これより、2002 年から 2004 年にかけて 2 年で 2 倍以上に増加している事が分かる。材料グループとして見ると、超純水、薬液、バルクガス、特殊ガスの要求事項が大幅に増加している。また、CMP スラリーや洗浄液に関して見ると、スラリーの種類や数値を明確にせずに項目だけ増加させている。これらは材料や使用するプロセスの指定を行うとともに、理論的な要求数値を設定していく必要がある。



図表 14-2 問題点 1: 「要求項目や TBD が大幅に増加」

14-4-2 問題点 2： FEP 要求項目との不統一

WECC の要求項目の設定値は、フロントエンドプロセス(FEP)の Table“Surface Preparation Technology Requirements”(SPT)の要求項目と統一性や整合性があるべきである。SPT はウェーハ表面汚染に対して最も厳しい要求値であり、これはそのまま環境の気中濃度に換算し、気中汚染(AMC)制御の要求値にできる。しかし、図表 14-3 の様に SPT では世代毎に厳しくなる係数は入っていないにもかかわらず、WECC では世代毎に厳しくなる係数が入っている。

問題点 2							
<ul style="list-style-type: none"> FEPのウェーハ表面汚染制御の要求値と不一致 × 世代毎の要求値に一貫性が無い 							
FEP要求値							
Year of Production	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Technology Node		hp90			hp65		
Critical GOI surface metals (10^{10} atoms/cm ²) [F]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Critical other surface metals (10^{10} atoms/cm ²) [F]	1	1	1	1	1	1	1
							
WECC要求値							
Year of Production	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Technology Node		hp90			hp65		
Gate—metals (as Cu, E=2×10 ⁻⁵) [I] (ppt)	0.15	0.1	0.1	0.07	<0.07	<0.07	<0.07
⇒FEPとWECCで整合性をとる							

図表 14-3 問題点 2:「FEP 要求項目との不統一」

さらにメタル汚染に関してみると、SPT ではゲート絶縁膜耐圧に影響する GOI キラーと、トランジスの動作不良を引き起こす可動イオンと、それ以外に影響のあるその他メタルとに 3 分類している。また、その影響の仕方からメカニズムを分けて計算して設定している。しかし、WECC ではこのような分類を行っておらず整合性が無いようにも見られる。これらの理由も確認して、理論的な要求事項としていきたい。

14-4-3 問題点 3： プロセスパラメータが要求項目

この項目で記述されているのは、メガソニック洗浄を効率的に行うための最低必要溶存窒素濃度である。これは一般的にプロセスパラメータであると考えられる。本来、WECC で記述する要求値とは、ある世代のデバイスをきちんと動作させるためのウェーハ製造環境に関する数値であるべきで、あるプロセスを効率よく行うためのプロセスパラメータでは無いと考えられる。他のリンス手法を考えた場合には別の溶存窒素濃度となる可能性も高く、WECC の要求項目にはそぐわない。WECC の要求項目の決め方をもう一度省みて、統一したコンセプトを設定し、プロセスパラメータをどのように取扱うか考えていく必要がある。

問題点 3

- プロセスパラメータが純度要求項目になっている
× UPW中の溶存窒素濃度 (MS)

<i>Year of Production</i>	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Technology node</i>		hp90			hp65		
Dissolved Nitrogen (ppm)	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12	8-12

効率的なmega-sonic洗浄可能な溶存窒素濃度を規定

⇒ 日本側でWECCでの考え方を提案する

図表 14-4 問題点 3:「プロセスパラメータが要求項目」

14-4-4 問題点 4： 実力値が要求値を既に凌駕

薬液の過酸化水素水 (H₂O₂) は、ゲート前処理で SC1 洗浄液として使うことを想定して要求値を決めている。このため、経済性が見合えば出来るだけ厳しい要求値を設定し、汚染の影響が考えられる濃度に対してマージンを持ちたいと考える。

問題点 4

- 実力値との乖離: バルクガス中不純物
× H₂O₂中のメタル濃度 150ppt に対し、実力値は < 0. 5ppt
× H₂中の N₂濃度: 50ppb に対し、実力値は < 0. 01ppb

<i>Year of Production</i>	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<i>Technology Node</i>		hp90			hp65		
<i>DRAM % Pitch (nm)</i>	100	90	80	70	65	57	50
<i>Liquid Chemicals [F]</i>							
IS	49% HF, 30% H ₂ O ₂ , 29% NH ₄ OH, 100% IPA: Na, K, Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Pb, Ca, Al, Zn (ppt, each)	150	150	150	150	150	150
<i>Bulk Gases (Contaminants, ppbv)</i>							
IS	H ₂ (N ₂ , Ar)	<50	<50	<50	<50	<50	<50

⇒ 要求値と実力値の整合性をとる

図表 14-5 問題点 4:「実力値が要求値を既に凌駕」

しかし、ここでの要求値は 150ppt となっている。現在手に入る薬液の GOI キラーメタル濃度の実力値が概ね <0.5ppt であることを考えると、かなり緩い値であることが分かる。また、SC1 洗浄液では通常過酸化水素水を数倍から数十倍に希釈するが、この希釈率では SC1 洗浄液中の濃度は 10ppt 程度になり、純水中メタル濃度の要求値である 1ppt との整合性が取れていないことがわかる。バルクガス中の不純物濃度の要求値でも一部実力値と大幅に乖離している。例えば、水素 (H₂) 中の窒素 (N₂) 濃度を 1ppb としているが、実力値は <0.01ppb に達しており、何故実力値に比較して甘い値で要求値を設定しているか不明である。この様に要求値の決め方が不明確なものに関しても、再度コンセプトを確認して整合性を取る必要がある。

14-5 ウェーハを取り巻く環境の変化

図表 14-6 に LSI に使用される材料の変化を示す。新材料系のメタルの導入が活発化している。各種工程で多種多様なメタルが導入されてきており、今後も増加すると予想される。半導体の創成期から現在に至るまで、クリーンルーム起因や装置起因のメタル汚染の低減活動を精力的に推進してきたが、現在並びに今後は新規に導入される各種メタルのクロスコンタミネーションを阻止することが重要となってくる。

LSI に使用される材料の変化

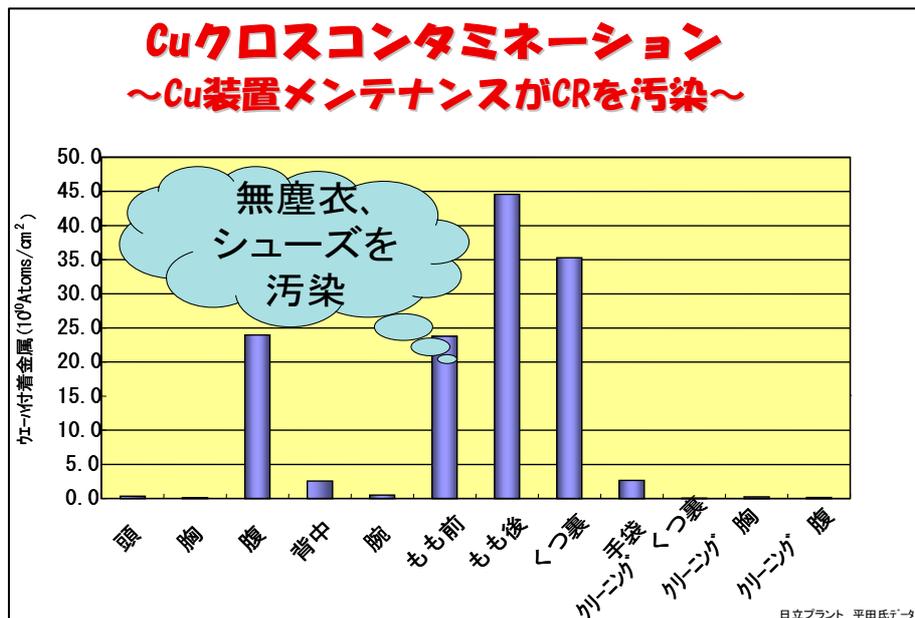
	Generation	Present		Future
FEOL	Technology Node	0.35~0.25 μm	130~90nm	65nm and beyond
	Starting Materials	CZ, EPI	CZ, EPI, HAI	CZ, EPI, HAI, SOI, SiGe.....Ge
	Gate Insulator (GOI)	SiON/SiO2	SiO2/Si(O)N	SiO2/High-κ (HfSiON...), κ < 10
	Gate Electrode	Pol-Si/WSix	Pol-Si/CoSix	Pol-Si/NSix, Metal
	Salicidation Contact	Ti, W	Ti, W, Co	Ti, W, Ni
	Capacitor Insulator	SiO2/SiN/SiO2	SiO2/SiN/SiO2	New Material (BST)
	Capacitor Electrode	Pol-Si	Pol-Si	Pol-Si, Metal (Ti, Ta, W, Pt, Ru, RuO2, ...)
BEOL	Interlevel Metal Insulator	SiO2	SiO2, FSG	Low-κ, ULK, ... Gas Gap ?)
	Wiring Material	Al-Cu	Cu, Al-Cu	Cu

ウェーハ製造プロセス自体が汚染源

図表 14-6 65nm技術以降のLSIに導入が計画されている新材料

14-5-1 Cu クロスコンタミネーション

図表 14-7 に Cu クロスコンタミネーションの例を示す。Cu は 130nm ノード以降の配線材料として用いられており、今後もその使用量は増加すると考えられる。Cu 装置のメンテナンスでクリーンルーム内部/無塵衣、シューズを汚染することがわかる。それが万が一ウェーハに転写すると、11 乗レベルの汚染を引き起こす。この濃度は半導体の性能劣化を引き起こす、非常に問題となるレベルである。



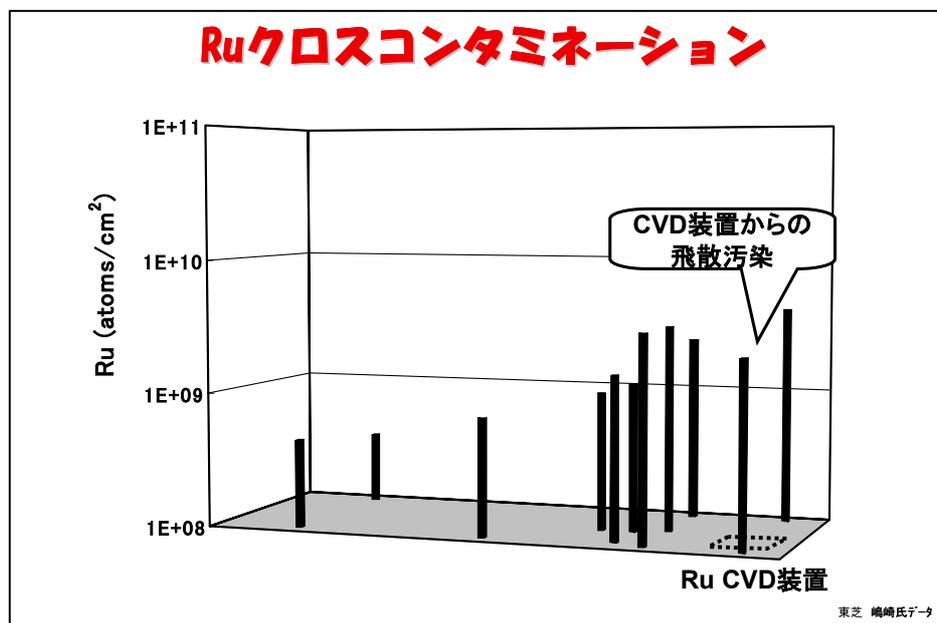
図表 14-7 Cu クロスコンタミネーション

さらにこれらの新規材料の中で Cu や Ni はある程度半導体製造プロセスでどの程度の影響があるかに関して研究されているが、実際にクリーンルームが汚染された時の実デバイスへの影響は計り知れない。

14-5-2 Ru クロスコンタミネーション

電極材として使用される Ru、Pt や High-k 材料に使用される Hf 等は、どの程度の汚染量でどの程度の影響を与えるかは詳しく知られていない。図表 14-8 に Ru CVD 装置のメンテナンス時の飛散汚染を示す^[1]。先の Cu 装置の場合、汚染はパーティクルとしての汚染であったのに対して、Ru の場合には RuOx という形の分子としての飛散汚染である。そのため、装置周りのみならず離れた場所でも検出されている。

WECC の設定値は、クリーンルームに供給される空気の清浄度であると考えられるが、今まで述べてきたように、ウェーハ製造プロセスあるいは製造装置自体が汚染源となってきた。多種多様なメタルを使用する今後のプロセスにおいて、どの程度まで汚染制御すべきか、クロスコンタミネーションを防止するためにはどうすべきか、ということが大きな課題となる。



図表 14-8 Ru クロスコンタミネーション

14-6 日本における WECC サブ WG の取り組み

これまで述べてきたように、日本においても WECC サブ WG を設置し活動を開始してきている。2004 年度の ITRS 東京ミーティングにおいて初めて欧米の WG と議論を行い、活動の概要を掴むことができた。その中で問題点や疑問点も浮かび上がってきた。それらの点に関しては欧米 WG と議論を行いコンセンサスを作りつつ、一方では日本 WG としても積極的に活動する予定である。我々は図表 14-9 のような 2 つの目標を設定して、国内各社の賛同を得て独自で理論的な WECC ロードマップにまとめていきたいと考えている。

目標 1: 日本版 WECC の Requirements Table の作成

14-4 項でも述べたように、ロードマップには不十分な点多々ある。というより永遠に完成しないものであると考えるべきであろう。そこで、常に世の中の動きを見ながらその時その時の最新の情報を盛り込んでいく必要がある。そこで、2005 年度の進め方としては、まず図 14-10 に示すように WECC 関係メーカのヒヤリングを通して実力値の提示を受けて現状を認識し、それを踏まえた上で日本の半導体産業にとってもメリットのある方向で、WECC の要求項目を設定していきたいと考える。欧米を中心に、デバイスメーカーへのワールドワイドなアンケートも計画されているが、これを利用しつつ日本としての独自のデータを收拾できるような方向で取り組んで

いきたい。

日本におけるWECCの取り組み

1. 日本版**Requirement Table**の作成
 - WECC関連メーカーとの議論

2. **Difficult Challenge**の設定
 - クロスコンタミネーション
 - ウェーハ持込汚染

図表 14-9 日本における WECC の取り組み

WECC関連メーカーベンチマーク

WECC関連メーカーと現状、今後の見通し等の議論を開始する

	アンモニア	塩酸	過酸化水素	硫酸	硝酸	燐酸	フッ酸	B-フッ酸
薬液メーカーA	○	○		○	○	○		
薬液メーカーB			○					
薬液メーカーC							○	○
薬液メーカーD							○	
薬液メーカーE				○				
薬液メーカーF	○	○		○	○		○	○
薬液メーカーG	○		○					

日本としての要求値を纏める

図表 14-10 WECC メーカーベンチマーク

目標 2:Difficult Challenge の設定

ウェーハを取り巻く環境の変化の項で述べたように、量産している 130nm ノード以降のデバイスでは、Cu を始めとする様々な金属のクロスコンタミネーションという困難な課題も抱えており、汚染対策が既に重要な課題となってきた。65nm 以降のデバイスでは、ますます新材料の導入が増えると予想され、ウェーハ持込汚染の防止やクロスコンタミネーション制御の重要性が高まっている。現在、各社各様でこのクロスコンタミネーションの防止に取り組んでいるものと考えられる。WECCとしてウェーハを取り巻く環境を考えるにあたり、このクロスコンタミネーションの問題を過小評価するべきではないと考えている。現状では、この課題をいかにロードマップの中に位置付けるか、という点に関して合意は得られていない。しかし、ユーティリティー、ファシリティーのクリーン度を向上させても、ウェーハ近傍で発生するこれらの汚染防止に取り組まなくては真の WECC とはならないと考え、あえて“Difficult Challenge”として問題提起していきたい。日本半導体産業にとって価値を見出せるような方法でこれらの調査を進めたいと考えている。

14-7 まとめと今後の課題

ITRS の Yield Enhancement TWG/ウェーハ環境汚染制御(WECC)サブ WG の活動が活発化したことを受け、WG11 内に新たに WECC サブ WG を発足させた。今年度のメンバーは8名を集め、WG11 定例会議と合わせ WECC サブ WG 単独での会議を開催し ITRS での議論内容の詳細把握と日本側意見の集約を図った。2004 年度は YMDB テーブルの改訂を日本で担当したが、2005 年の本改定に向け欧米の協力が不可欠となっている。Defect Budget (装置許容欠陥数)に関するワールドワイドでのデバイスメーカー実態調査の実施、FEP など他の WG との Yield Model の整合を図ることなどが必要であるが、これを推進するための実務部隊、歩留まりモデル検討での専門家を確保できておらず、実働上の課題が残る。

2005 年度は他 WG とのクロスカットも含め WECC に関する検討をさらに進める。また、2003 年度に一部実施した計測・検査・分析技術でのポテンシャルソリューションの検討などを進める予定である。SEAJ、産総研(計量標準部門)との協調を深め、日本保有技術の発掘を進め将来技術の見通しを立て、STRJ ロードマップ活動としていきたい。

参考文献

- [1] A. Shimazaki et al, "Controlling Ru Airborne Contamination in Cleanroom", *Proceedings of International Symposium on Semiconductor Manufacturing 2004 (ISSM2001)*, pp.333-336, October 2001.