

第 14 章 WG11 歩留り向上

14-1 はじめに

ITRS の Yield Enhancement (YE) 章には 4 つの技術領域があり、それぞれを各極で分担する形で運営されている。その中で、日本(WG11)は歩留まりモデルと装置許容欠陥数(YMDB: Yield Model & Defect Budget)を分担している。今年度は 2 年毎に行われる ITRS 改定の中間年にあたるので、Table 内容の更新がアウトプットになる。主な国際活動は、年 3 回の ITRS 定例会議(第 24 回/2006 年 4 月_欧州マーズトリヒト, 第 25 回/2006 年 7 月_米国サンフランシスコ, 第 26 回/2006 年 12 月_台湾新竹)への代表者派遣、並びにメールベースでの他 ITWG メンバとの更新内容協議である。国内活動では、分担領域の最新技術動向に関して国内専門家からヒアリングを行った。また STRJ ワークショップにおいては、設計/テスト/M&S とのオーバラップ領域での歩留まり向上手法に関して独自提案を行った。

14-2 ITRS 2006 年版更新

YE 章の他の 3 つの技術領域については、DDC (Defect Detection and Characterization) を欧州/米国、WECC (Wafer Environmental Contamination Control) を米国/欧州が中心となって Table 内容を更新した。YL (Yield Learning) は台湾の分担だが、近年は具体的活動が休止しており、第 26 回台湾新竹会議では、台湾が米国/欧州のサポートを得て活動を再開する事が確認された。以下では、今年度に更新が行われた YMDB/DDC/WECC について解説する。

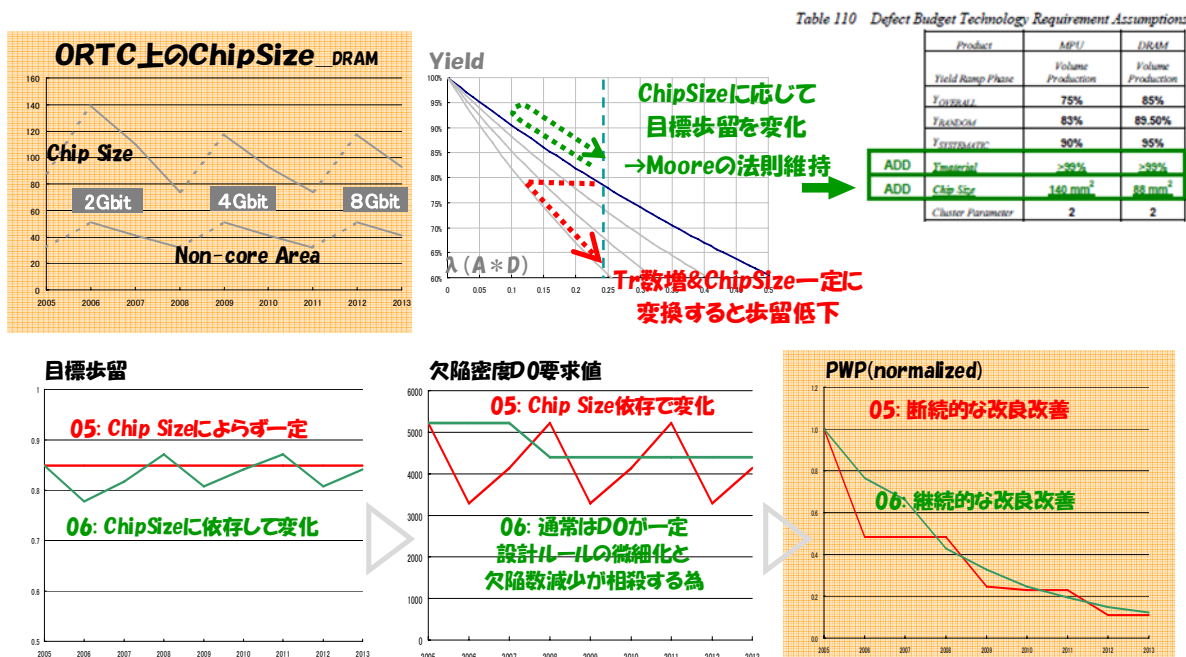
14-2-1 YMDB

旧版では不十分となっていたロードマップ内での技術的整合性を回復する為に、Table 110-112 に対して 2 点の修正を行った。第 1 は、装置許容欠陥数計算を行う際の規準となるチップサイズが定められていない為に、ORTC から持ち込まれるチップサイズの変動がそのまま装置許容欠陥数の変動に反映してしまう問題を、基準チップサイズを設定する事により解決した。図表 14-1 に具体的変更内容を示す。Table 上で多数の数値が変更されているのは、該修正による PWP の再計算によるものであり、変更理由は一つである。第 2 は、FEP との間で議論されて来た歩留モデルに用いる数式の選択について、Ymaterial という材料起因歩留低下要素を新たに導入する事により、複数の歩留モデル(FEP はポアソン分布、YE は負の 2 項分布)が共存出来る様にした。YE の視点では、ウェーハ面内の不均一性を実状に合わせて調整可能な数式でない精度が確保出来ないで、ポアソン分布の導入は困難である。ウェーハ面内分布の不均一性相違による歩留差に関しては、 λ (欠陥数/Chip) が大きな領域で顕在化するので、例えばプロセス立ち上げ初期に大きなチップサイズの製品の歩留予測を行う場合等でその差が顕著になる。負の 2 項分布に於けるウェーハ面内の不均一性を調整するクラスタ係数は、これまでの ITRS 改定/更新で 2→5→2 と変遷して来た。この変遷は、DB が歩留成熟/量産時の指標であるのに対し、YM の方はプロセス立ち上げ初期の利用者がいる事を示すと考えられる。

また、Table 111-112 に於ける装置許容欠陥数見積は、外延計算に用いる基準データが 2000 年までの SEMATECH メンバカンパニーによる Defect Budget Survey 時のものを未だに使用している状況であり、その更新が求められている。期首においては SEMATECH が Defect Budget Survey 再実施に非協力的であったので独自調査の実施を考えたが、期中に STRJ からの ISMI (International SEMATECH Manufacturing Initiative) 加盟が複数社に及ぶ展開となった為、SEMATECH と協調した実施計画をまとめる方向へと方針転換した。2007 年 4 月初には、ISMI の Yield Council に参加して YMDB の説明とアンケートへの協力要請を行った。また、Flash に対応する Table の未整備が指摘される処となり、ITWG で対応策の検討を開始した。

2006update: PWP計算の標準化 問題点/修正

ORTCから輸入したChipSizeに YE章の基準歩留を適用すると...



図表 14-1 PWP 計算の標準化

14-2-2 DDC

今回から Table に於ける基準ウェーハサイズが、従来の 200mm から 300mm に変更された。パターン付ウェーハ検査については、従来の欠陥検出率 90%に加えて 50%のスペックが設定された(図表 14-2)。また Review 装置との連携の為に位置精度要求追加、パターン無しウェーハ検査でメタル/Poly 膜などのウェーハ表面状態への考慮見直し(図表 14-3)、ADC 分類要求引き下げ(20~25→10)が盛り込まれている。

今回の更新は、全体的に ITRS 上の DDC モデルと、IDM に於ける実際の外観・異物検査装置の生産現場運用とのギャップを狭める方向での記述追加であり、十分満足出来るレベルにそのギャップを狭めたとは言えないが、着目すべき内容変更と考える。

パターン付ウェーハ検査においては、従来から欠陥サイズの定義があいまいであるという問題とともに、欠陥検出率の定義の問題がクリアになっていないという経緯を引き摺ったままである。今回、欠陥検出率の定義においては、R&D での検出率 50%というテーブルを追加しての事実上のスペック緩和にみえるが、検査装置の感度限界の問題から来る実感度がデザインルールに追随できなくなりつつあるという問題を、検出率の緩和を R&D レベルという条件付きで定義することで、より現実的感度定義へのルートをひらいている。また、パターン無しウェーハ検査では、メタル膜や Poly 膜での表面性状によるバックグラウンドノイズの増加に伴う実質上の感度劣化を加味したテーブル値の導入が実現し、現場との乖離が緩和された。

WG11 としては、欠陥サイズに関する標準化等に展開する様に提案していく。また DDC では、ISMI での評価結果を活用している部分に於いて、その根拠となるデータが(ISMI メンバカンパニー以外には)開示されない場合がある事が判明した。

2006update: 欠陥検出率50%のSpec.追加

定義追加で **ロードマップ要求数値と実用的感度との整合性を向上**

- 残された問題 -

感度サイズ(sensitivity)定義が各装置メーカー&検出方式で異なる。
ex. \sqrt{XY} , $(X+Y)/2$, $\sqrt{X^2 + Y^2}$

↓
ITRSで議論しコンセンサスを得て、SEMIで規格化が望まれる。

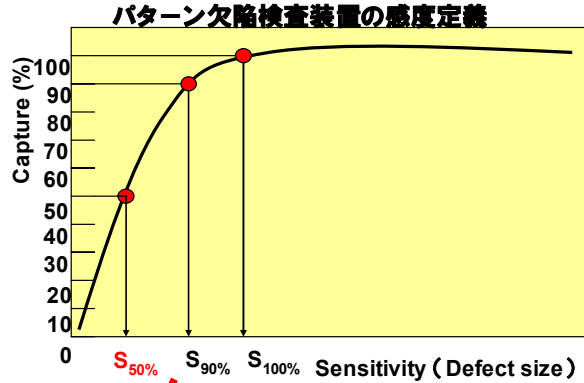


Table 113b Patterned Wafer Inspection, ~

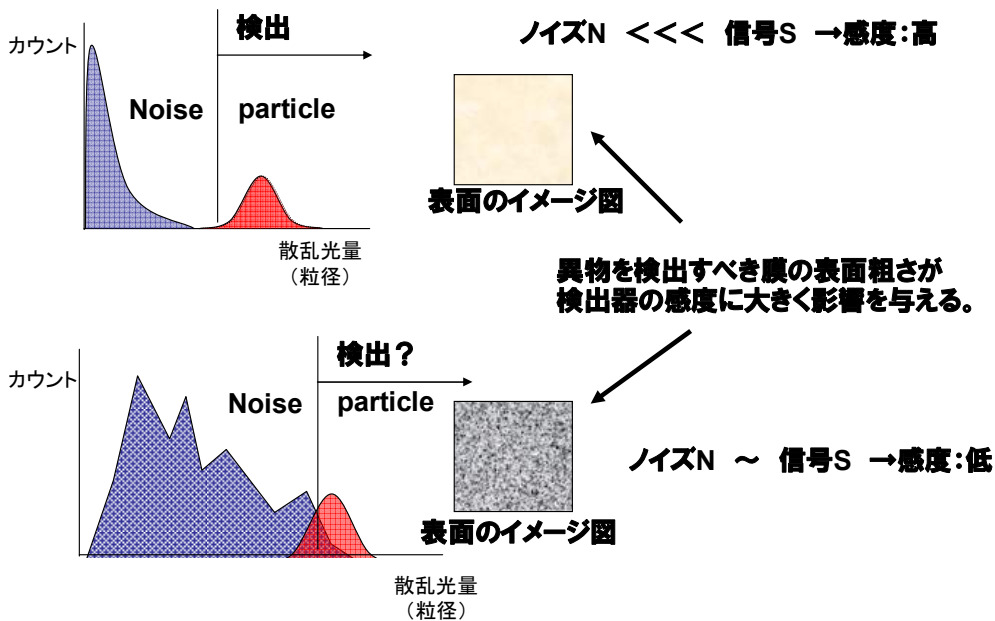
| | | | | |
|------------|---|------|-----|------------------------------|
| ADD | Process R&D at 300 cm ² /hr ⁴ with 50 % Capture rate. | 10.0 | 2.0 | 0.3 μm DR₁ |
| Yield ramp | at 1200 cm ² /hr ⁴ | | | |

2006New !

図表 14-2 欠陥検出率 50% の Spec. 追加

2006update: ウェーハ表面状態差への考慮見直し

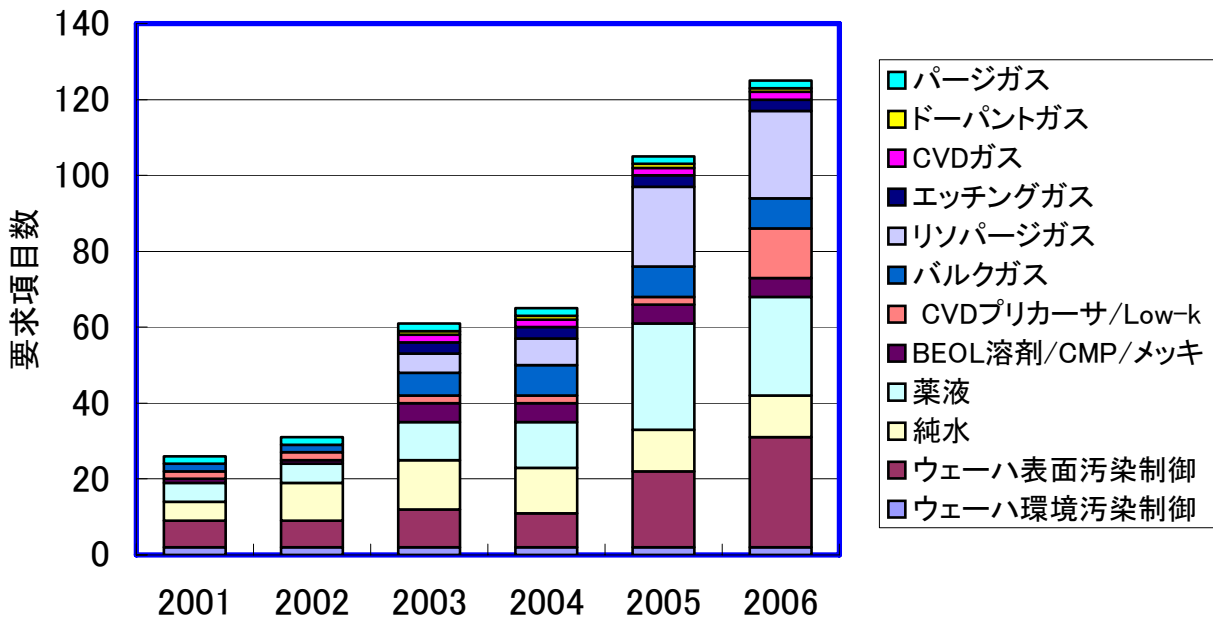
Non-patterned wafer に於ける表面粗さ分類問題



図表 14-3 ウェーハ表面状態への考慮見直し

14-2-3 WECC

2006 年 Update 版においては、項目数が約 20 項目増加している。特に増加している項目として上げられるのが図表 14-4 に示すように AMC (Airborne Molecular Contamination) と ILD CVD Precursor である。



図表 14-4 WECC 要求項目の変遷

AMC は図表では「ウェーハ表面汚染制御」で示されている。AMC で増加している項目を図表 14-5 にまとめる。

| 項目 | 対象 | 要求値 |
|--|-------------|------|
| Total Organic Acids (TOA) (ppt) | リソグラフィー環境 | TBD |
| | レティクル保管環境 | |
| | サリサイドーション環境 | |
| | Cu ウェーハ環境 | |
| | Al ウェーハ環境 | |
| SMC (surface molecular condensable) refractory compounds on wafers, ng/cm2/day | リソグラフィー環境 | 2 |
| | レティクル保管環境 | |
| Total other corrosive species (TOCS)(ppt) | Cu ウェーハ環境 | 1000 |

図表 14-5 AMC で増加した要求項目内容

TOA に関しては、これまで「Total acids (as SO₄) including organic acids」という表現で記述されていたが、特にリソグラフィー環境制御において、無機酸と有機酸をトータルで議論することが汚染としての影響度や分析上無

意味であることからの変更である。サリサイデーシオン環境、Cu 配線環境、Al 配線環境において同様の変更が加えられたのは、項目としての整合性を取るためと考えられる。ただし、ここで注意しておくべきは、この新しく設定された項目の狙いはケミカルフィルターへの負荷を減らすことにあることと、この項目に対する要求値が「TBD (To be determined)」となっていることである。今後、この数値を決定していくことが課題である。また、リソグラフィ環境とレティクル保管環境に SMC refractory compounds が追加されたのは、レティクルヘイズがますますクローズアップされてきたためである。Cu 配線工程に導入された「Total other corrosive species」の意味するところは塩素や水分である。注釈には、水分は腐食性雰囲気では可能な限り抑制する必要がある、という記述があるが、ロードマップとしては相応しい表現ではないと考えられる。

| 対 象 | 項 目 | 要求値 |
|---|---|-------|
| ILD CVD Precursors (e.g., Trimethylsilane, Tetramethylsilane) | B, Au, Ag (ppb, each) | <10 |
| | CO, CO2 (ppm) | < 0.5 |
| | Non-methane hydrocarbons C2-C4 (ppm) | < 4 |
| | Nitrogen (ppm) | < 2 |
| | Ar+O2 (ppm) | < 0.5 |
| | Chloride (ppm) | <1 |
| ILD CVD Precursors (e.g., Trimethylaluminum) | Metals each element (ppb) | <150 |
| | O2 (ppm) | <10 |
| | Silicon (ppm) | <1 |
| | Hydrocarbons (ppm) | <5 |

図表 14-6 ILD CVD Precursors に対する追加項目

図表 14-6 に示す対象に関しては、項目内容および示されている数値の妥当性に関し欧米メンバと議論を行っていく予定である。

14-3 今後の改定

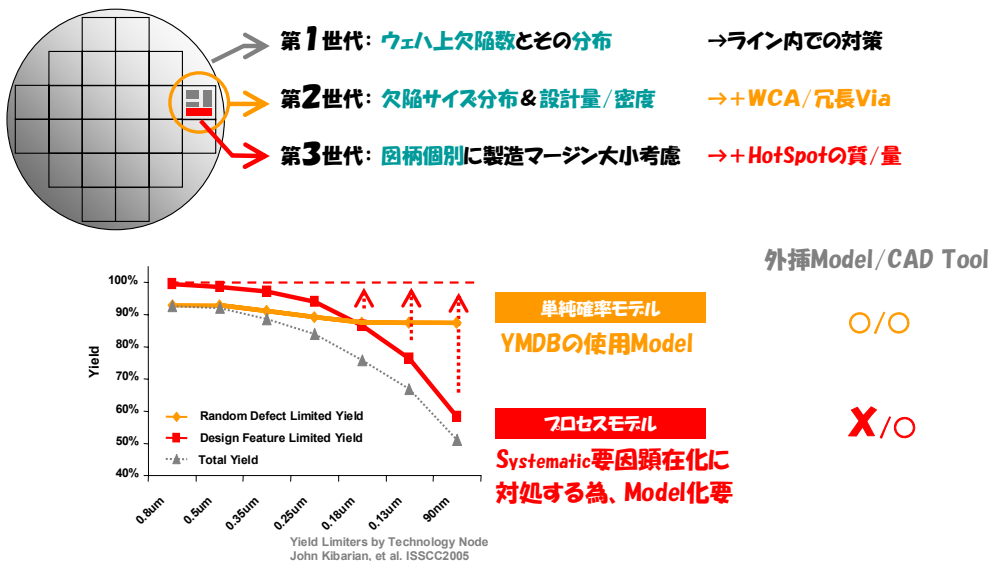
ムーアの法則に従った設計大規模化とデバイス微細化の同時進行は、YMDB にはレティクル上の大規模設計内容の相違が生み出す歩留差についてのモデル化を要求し、DDC/WECC にはデバイス微細化に追従出来る検査能力の高速/高分解能化を要求する。YE-ITWG で議論されている今後の改定に関するトピックスを以下で紹介する。

14-3-1 YMDB

歩留モデルは、3 つの世代を持つものとして捉えると分かり易い(図表 14-7)。第 1 世代は、ウェーハ上の欠陥数及びその分布の不均一性を数式でモデル化したものである。該不均一性は、数式が内包する確率密度分布としてモデル化されるもので、シード/マーフィ/ポアソン等の確率密度分布が異なる多くの数式間で、実歩留との整合性が議論された。現在は、負の 2 項分布におけるクラスタ係数の調整で、色々な状態のウェーハラインをある程度の精度で表現出来るという理解が一般的である(図表 14-8)。第 2 世代は、同じチップサイズでも設計内容相違が歩留相違を引き起こす確率モデルを組み込んだものであり、ランダム性欠陥が有する欠陥サイズ分布特性と設計密度を考慮して不良発生確率を算出する(図表 14-9)。このモデルは、Table111-112 の装置許容欠陥数予測の算出においても使用されている(図表 14-10)。ワイヤ・スプレディングによる歩留向上等は、このモデルで説明可能である。また一方で、欠陥サイズ分布特性として採用してきた x^{-3} モデルの限界が議論されており、該領域研究のトレースも必要になっている(図表 14-11)。第 3 世代は、今後の改定で議論が必要なモデルであり、面積や確率からそのまま歩留が確率計算出来た第 2 世代とは異なり、プロセスのモデル化を必要とする。代表例としては、リソグラフィによって制限される製造マージンがあげられる。一般に歩留モデルは、合理的で実効のある歩留向上/維持施策が検討出来る様、歩留に寄与する主要因を網羅する事が求められる。よって今日では歩留まり確保に必須となった各種 DFM も、ランダム性欠陥と同様に歩留モデル中への取り込みが求められている。また YE における歩留の定義そのものについても、”各工程での形状異常”に留める、若しくは”製品に於ける特性異常”で判断する等、より精密な議論が必要となって来た。

future objectives: 歩留モデルの変遷

ウェーハライン外要因のYield寄与が増加 = DFMしていく中で



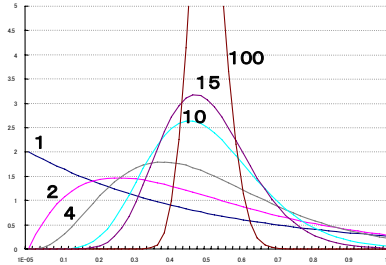
図表 14-7 歩留モデルの歴史

Wafer Model: 負の二項分布

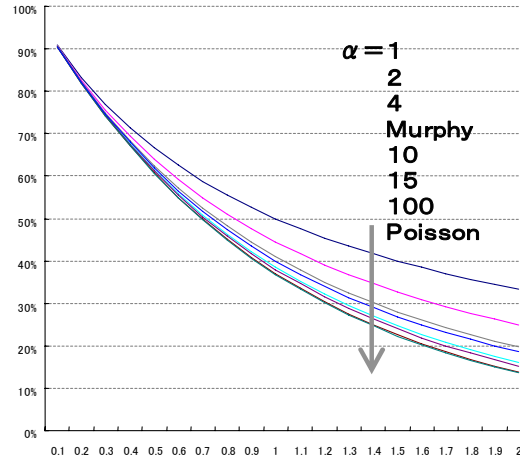
クラスタ係数 α の調整で 多様なウェハ面内依存性に対応

$$\text{Yield} = 1 / (1 + \lambda / \alpha)^{\alpha}$$

α vs. Failure probability density



λ vs. Yield

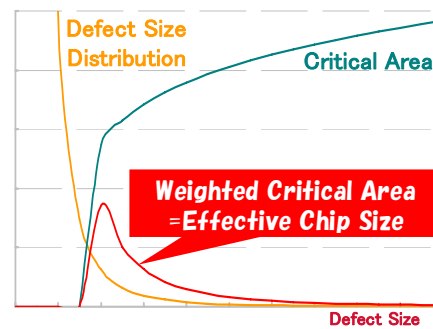
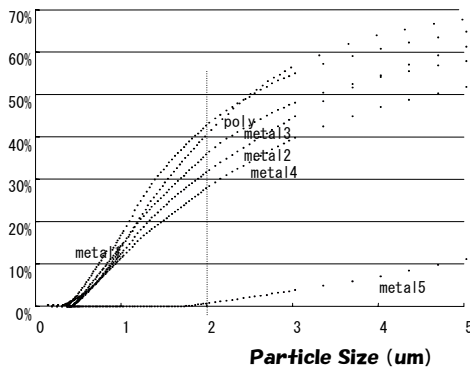


図表 14-8 負の 2 項分布

Chip Model: Weighted Critical Area

同じチップサイズでも歩留が異なる理由を説明出来る歩留モデル

Possibility Of Failure



多くのIDMが既に歩留のクリティカルエリア依存を評価済?

図表 14-9 ウェイトドクリティカルエリア

14-3-2 DDC

今後の検討項目として、マクロインスペクションに関するテーブル作成、Table113 を patterned /non-patterned /characterization に分割して再整理する事、Review 装置との連携に関する要求事項やウェーハ表面状態を考慮した Table 化の更なる検討、HARI への DUV 適用の Table 化が予定されている。

14-3-3 WECC

プロセスインテグレーションによる影響の明確化、規格緩和出来る部分の緩和推進、クリティカルイオン/ガス中コンタミネントのリスト更新、評価/計測用試薬、パーティクルの規格化/測定方法、プロセス固有要求仕様のまとめ、WECC 以外の部分に関する SPC 管理を含めた WEPC、有機物と要求仕様等の検討を進める事が予定されている。

14-4 国内活動

WG11 では、昨年に引き続き関係領域の専門家からのヒアリングを、WG11 全体及び WG11-WECC SWG 単独の 2 つの形態で実施した。また各会議での討論を通して得られた知見を、技術開発方向に関する提言としてまとめ、STRJ ワークショップで発表した。

14-4-1 WG11 全体での専門化ヒアリング

WG11 全体で実施した専門家からのヒアリングは、以下の 8 件である。

| | | |
|-------|-------------------|----------------|
| 6/29 | スキヤトロメトリ | Timbre(TEL) |
| 7/27 | 欠陥密度分布 | 日本無機 広島大学 |
| 9/28 | OPC Hotspot 検出 | NGR 日立 HT |
| 10/26 | 計測の不確かさ | 産総研 |
| 1/17 | マスク測長 OPC | HOLON Brion |

図表 14-12 2006 年度 専門家ヒアリング(敬称略)

また、STRJ ワークショップでの設計/テスト/M&S とのハネル討論に際しては、境界領域でのコラボレーション提案として、歩留予測と P&R の連携(図表 14-13)、形状シミュレーションとテストパターン生成の連携(図表 14-14)、形状シミュレーションを活用した簡易 Diag.(図表 14-15)の 3 点を提案した。

歩留予測と P&R の連携については、歩留モデルを延長する事で得られる単位面積辺りの良品数の式を評価関数とすれば、不良率予測されたプリミティブを P&R 時に該評価関数の増加方向へと取捨選択するプレースを行う事により、良品数/ウェーハを増加させるアルゴリズムになる事を説明した。形状シミュレーションとテストパターン生成の連携については、OPC による形状修正が必須ではないが他よりマージンが少ないマスク部分を形状シミュレーションから抽出し、該部分のオープン/ショートを検出するテストパターンを生成/優先使用する事で、短かいパターン長でスクリーニング効果の大きいテストパターンを作れないかというアイデアである。形状シミュレーションを活用した簡易 Diag.については、製造条件のコーナにおいてリソ形状シミュレーション/CAA 計算等を用いて発生するであろう不良を推定し、該不良を優先的に除去するパターンを該コーナ毎に作成する事により、テストパターン間の不良率差から逆に製造条件のずれを推定するアイデアを提案した。設計起因のシステムティック欠陥は各チップ共同じマスク個所が不良となるが、プロセス起因のランダム欠陥の場

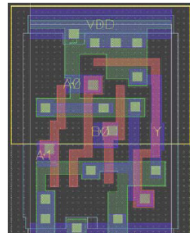
合、例えばパーティクルによる配線ショート増加では、クリティカルエリアの大きな配線のショート確率が高くなるが、各チップ共特定配線のみが不良になる訳ではない。

Model Sharing : TCAD / TEG - YE - P&R

各図柄の歩留をTCAD/TEG等で把握し P&R時のマスク形状判断に活用

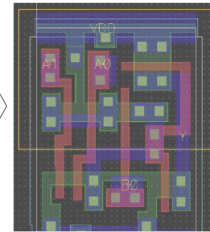
面積 A & 不良確率 λ のレイアウトを
面積 A' & 不良確率 λ' に変更する場合、
歩留/面積を評価関数 R とすると

$$R = \frac{1}{A} e^{-\lambda}, R' = \frac{1}{A'} e^{-\lambda'}, R' > R$$



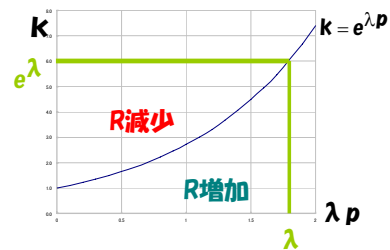
ex.
Area +20%
F.Rate -50%

SOURCE:
A.Strojwas 2005
IEEE WesconD2M



ここで、 $A' = kA$, $\lambda' = \lambda - \lambda p$
($\lambda \geq \lambda p \geq 0$) とすると

$$k < e^{\lambda p}$$



ここで、 $e^{\lambda p} = 1 + \lambda p + \frac{\lambda p^2}{2!} + \frac{\lambda p^3}{3!} + \dots$ だから

Chip面積増加ppbより不良率減少ppbが大きければ、変更した方が得

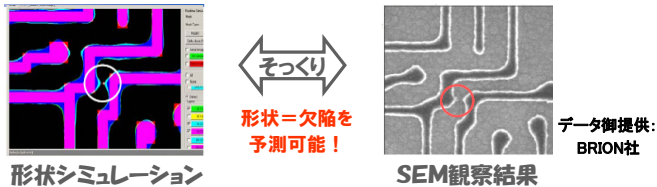
図表 14-13 TCAD/TEG-YE-P&R

Model Sharing: TCAD-YE-Test

直せるものは直すが 直せなかった部分は テスト時に優先確認出来ないか？

TCAD-YE

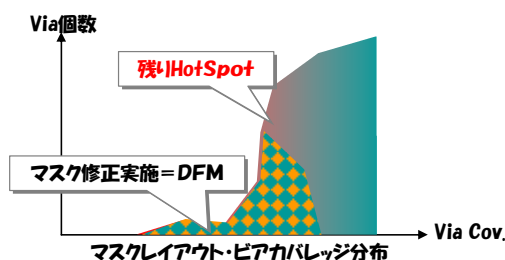
リソ・CMP等プロセスモデルの精度が向上しDFMで活用



YE-Test

歩留モデルを テスト生成用の故障モデルに転用

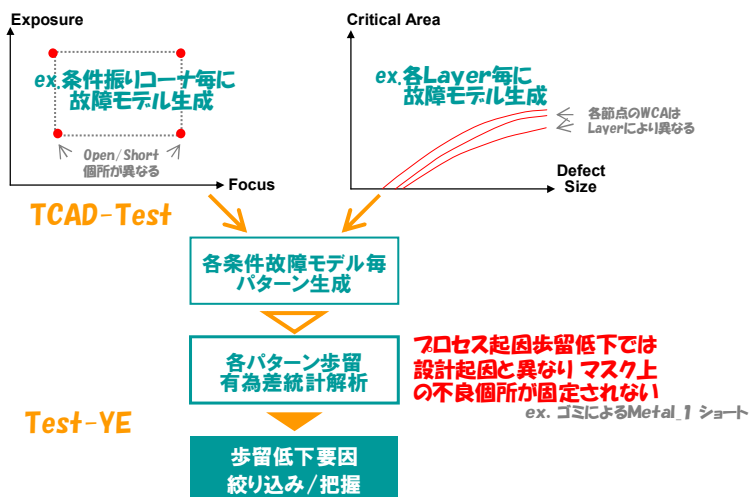
ex. 未修正 = 残りHotSpotを優先して叩くパターン」の生成



図表 14-14 TCAD-YE-Test

Model Sharing: TCAD-Test-YE

条件の異なる故障モデルを活用して プロセスをDiag.出来ないか？



図表 14-15 TCAD-Test-YE

14-4-2 WECC-SWG の専門化ヒアリング及び国内活動

2004 年度の報告において、WECC サブワーキンググループを WG11 の中に発足させたこと、また、活動を始めるにあたって ITRS ロードマップを調査し、問題点や課題を見出し、その中の一つとして日本の WECC 関連メー

カーとの実力値の乖離を認識しベンチマークを行うことを述べた。2005 年度は、その結果について報告した。今年度はこの結果を元に、また、同時に問題提起した要求項目数の増大を回避できるようなロードマップの作成に取り掛かった。

ここでは日本の薬品メーカーの実力値を、ロードマップの要求値と比較して再度まとめるとともに、その実力値を達成している背景を簡単に述べる。

図表 14-16 に日本の薬品メーカーにおける純度実力値と WECC 要求値との比較を示す。酸性溶液中のパーティクルに関しては、WECC 要求値を達成できていないが、メタル汚染に関しては大幅に上回っていることが分かる。

| WECC 要求値 | | | A社 | B社 | C社 | D社 |
|----------------------------|-------------------------|-------|---------------|----------------------|---------------|----------------|
| HF HCl | particles(/ml) >65nm | <10 | <50 (>0.1) | | | |
| H2O2 NH4OH | particles(/ml) >65nm | <1000 | | <100 ~ 200 (>0.1) | <50 (>0.1) | <200 (>0.1) |
| HF HCl H2O2 NH4OH | metals(ppm) | <150 | <1.0 | <1.0 | 1.0 ~ 5.0 | <1.0 |

図表 14-16 日本の薬品メーカーにおける純度実力値と WECC 要求値との比較

薬液製造の実力例



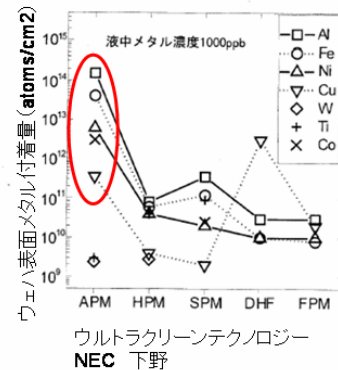
| | | | |
|-------|----|------|--------------------------------|
| NH4OH | 従来 | 工業用 | メタル残留 強アルカリ性⇒ウェーハに吸着 |
| | 現状 | 高純度化 | NH3(g) + H2O → NH4OH |
| H2O2 | 従来 | 工業用 | メタル、触媒アンスラキノン残留 |
| | 現状 | 高純度化 | 工業用から多段フィルタで有機物、 メタル、アニオン除去 |

高純度化の製造のポイント

1. 高純度ガス+純水(再精製)で製造
2. 配管等はメタルフリー採用(PTFE/PFA等)
3. 製造後のフィルターによる精製

薬液中のメタル濃度 <1ppt(実力値)を達成

微量分析技術の確立によるフィードバック⇒
高純度化に成功



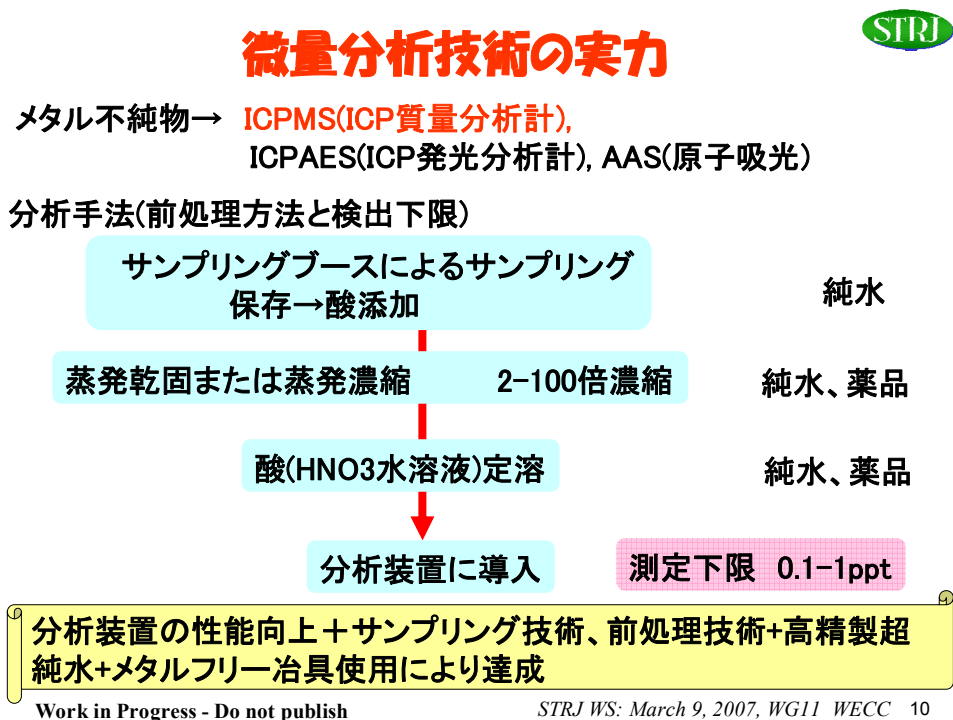
図表 14-17 アンモニアと過酸化水素の製法と高純度化のポイント

半導体製造工程では各種薬品が使用されているが、ここではアンモニアと過酸化水素について図表 14-17 に示す。両者は近年までメタル汚染を排除しにくい、もしくはメタル汚染が入りやすい薬品の代表とされてきた。各種洗浄液中にメタル汚染を混入させた場合、薬液により種々の形態でウェーハ上に析出または吸着するが、APM(NH₄OH/H₂O₂/H₂O)中にメタルが存在した場合のウェーハ表面吸着メタルは、他の酸性洗浄液に比べ非常に多い。これは APM 洗浄中に Si 表面に形成されるケミカルオキシド中や表面にメタル酸化物の形態で取り込まれやすいからである。従って、アンモニアや過酸化水素中のメタル汚染は微量に抑制することが必要である。

アンモニア水: 高純度アンモニアガスに純水を加えて生成する。配管系はすべて PTFE/PFA を使用している。メタル不純物の実力値は 1ppb 以下である。

H₂O₂: 工業用の H₂O₂-60% (危険物 6 類) を原料としている。ロットが変わる前に分析を行っている。工業用は触媒として使用するアンスラキノン残渣のため 50ppm 程度含有されている。この工業用過酸化水素を 0.03μm のフィルター 4 段でパーティクル除去をした後に有機物、メタル、アニオンの除去をし純水で希釈した後フィルタリングして充填している。スペックはメタルで 1 から 5ppb である。

高純度の製造ポイントは高純度ガスに再精製した純水を添加して製造すること、製造ラインの配管等はメタルフリーを採用すること、製造後はフィルターによりパーティクルおよび各種不純物を除去することである。また、デリバリーによる汚染評価なども実施している。



図表 14-18 薬品メーカーの分析技術

図表 14-18 に薬品メーカーの分析技術について示す。各社ともに独自で分析部門を保有している。メタル分析装置に関しては高感度分析が可能な ICPMS、ICPAES、AAS を所有しており、これにより微量分析を行っている。さらに、各社とも分析前処理方法を重要な技術と位置付けてノウハウとして大切に所有している。サンプリングから測定まで汚染を排除した操作、濃縮操作を経て硝酸等の酸を添加してメタルを溶液中で安定化させた後に分析装置に導入して分析する技術など、一連の技術の集大成により測定下限 0.1-1ppb を実現している。分析装置の性能向上だけでなくサンプリング技術、前処理技術、純水メーカーの供給する超純水をさらに一桁高純度化する技術、メタルフリー器具使用、分析用クリーンルームなどの分析環境の整備により高感度分析が達成できている。また、分析者のスキルも必要であり、認定制を採用しているところが少なくない。

このように、高純度薬液の製造には製造プラントの整備、製法の見直しに加えて、実際に製造された薬液の微量不純物計測技術が必要であり、この分析技術があつて初めて薬品の高純度化への取り組みへのフィードバックができるのである。

最後に、日本版ロードマップへの取り組みについて述べる。

現在のロードマップには、薬品に見られたような日本のメーカーの実力値との乖離の他に、要求値がロードマップになっていない、即ち製品世代が進行していても要求値が変化しない、という問題もある。現状、120 以上ある要求項目の中で要求値が変化しているのはパーティクルサイズと数、金属汚染量、SMC などごくわずかである。これは、WECC を主導している欧米のメンバがファシリティーメーカー中心であるため、“純度の仕様”が要求値になる傾向にあるためと考えられる。そこで、図表 14-19 に日本版ロードマップの考え方を示す。

| | ITRS | 日本版考え方 | STRJ |
|------|---------------------------------------|------------------|---------|
| 対象領域 | ウェーハ表面+ α α :リソパーズガス | ウェーハ環境のみに限定 | ウェーハ表面 |
| 対象者 | 建屋/ファシリティーメーカー | 環境改善ではなく LSI性能達成 | デバイス |
| 要求数値 | 実力値 分析下限 | LSI性能達成 | 性能達成必要値 |

図表 14-19 日本版ロードマップの考え方

- ①対象とする領域をウェーハ環境のみとする。現状要求値として規定されているリソグラフィーを対象としたレティクル保管環境やパーズガスを WECC で取扱うべきリソグラフィーグループなどと議論していきたい。
- ②ロードマップの対象としてややファシリティーメーカー寄りになっている点が見受けられるので、製品世代の進行やデバイス構造、使用材料の変更などを考慮した“その世代に必要な要求値”を記述できるロードマップが必要であると考えます。