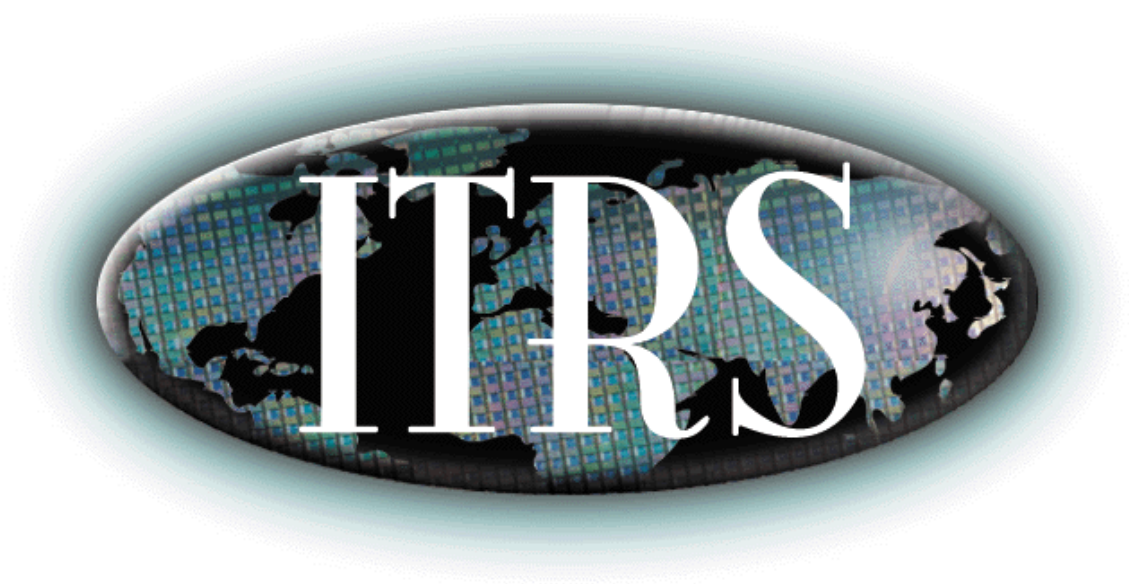




INTERNATIONAL  
TECHNOLOGY ROADMAP  
FOR  
SEMICONDUCTORS

2011 EDITION

YIELD ENHANCEMENT

THE ITRS IS DEVISED AND INTENDED FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT ONLY AND IS WITHOUT REGARD TO ANY COMMERCIAL CONSIDERATIONS PERTAINING TO INDIVIDUAL PRODUCTS OR EQUIPMENT.

# 訳者まえがき

この文書は International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 Edition(国際半導体技術ロードマップ 2011 年版)本文の日本語訳である。

国際半導体技術ロードマップ(以下 ITRS と表記)は、米国、日本、欧州、韓国、台湾の世界5極の専門家によって編集・作成されている。日本では、半導体技術ロードマップ専門委員会(STRJ)が電子情報技術産業協会(JEITA)内に組織され、日本国内で半導体技術ロードマップについての調査活動を行うとともに、ITRS の編集・作成に貢献している。STRJ 内には 15 のワーキンググループ(WG: Working Group)が組織され、半導体集積回路メーカ、半導体製造装置メーカ、材料メーカ、大学、独立行政法人、コンソーシアムなどから専門家が集まり、それぞれの専門分野の調査活動を行っている。

ITRS は改版を重ねるごとにページ数が増え、2011年版は英文で 1000 ページを超えるの文書となった。このような大部の文書を原文で読み通すことは専門家でも多大な労力を要するし、専門家であっても技術分野が少し異なると ITRS を理解することは必ずしも容易でない。STRJ の専門委員がその専門分野に応じて ITRS を訳出することで、ITRS をより親しみやすいものにすることができるのではないかと考えている。

なお、ITRS 2005 年版(英語の原書)までは、ウェブ公開とともに、印刷された本としても出版していたが、ITRS 2007 年版以降、は印刷コストが大きくなってきたこと、ウェブ上で無料公開されている文書の出版版を本の形で有償頒布しても需要が限られることなどのため、印刷物の形での出版を断念し、ウェブ公開のみとなった。ITRS の読者の皆様にはご不便をおかけするが、ご理解願いたい。ITRS 2009 年版以降、電子媒体で ITRS を公開することを前提に編集を進め、ITRS の表は原則として、Microsoft Excel のファイルとして作成し、そのまま公開することにした。

ITRS は英語で書かれている。日本語訳の作成は、STRJ 委員が分担してこれにあたり、JEITA の STRJ 担当事務局が全体の取りまとめを行った。訳語については、できる限り統一するように努めたが、なお、統一が取れていないところもある。また、訳者によって、文体が異なるところもある。ITRS の原文自体も多くは専門家による分担執筆であり、そもそも原文の文体も一定していないことも、ご理解いただきたい。誤訳、誤字、脱字などが無いよう、細心の注意をしているが、短期間のうちに訳文を作成しているため、なお間違いが含まれていると思う。また、翻訳の過程で原文のニュアンスが変化してしまうこともある。訳文についてお気づきの点や、ITRS についてのご批判、ご意見などを事務局まで連絡いただけますよう、お願い申し上げます。

今回の訳出にあたっては、ITRS の本文の部分のみとし、ITRS 内の図や表の内部の英文は訳さないでそのまま掲載することとした。Executive Summary の冒頭の謝辞(Acknowledgments)に、ITRS の編集にかかわった方々の氏名が書かれているが、こども訳出していない。

原文中の略語については、できるかぎり、初出の際に、「ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように()内に原義を示すようにした。英文の略号をそのまま使わないで技術用語を訳出する際、原語を引用したほうが適切と考えられる場合には、「国際半導体技術ロードマップ(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors、以下 ITRS と表記)」「国際半導体技術ロードマップ(International Technology Roadmap for Semiconductors)」のように和訳の後に()内に原語やそれに対応する略語を表示した。Executive Summary の用語集(Glossary)も参照されたい。原文の括弧()があってそれを訳するために括弧を使った場合もあるが、前後の文脈の関係で判別できると思う。また訳注は「【訳者注:この部分は訳者の注釈であることを示す】」のように【】内に表記した。また[]内の部分は、訳者が原文にない言葉をおぎなった部分であることを示している。訳文は厳密な逐語訳ではなく、日本語として読んで意味が通りやすいように意識している。ITRS のウェブ版ではハイパーリンクが埋め込まれているが、今回の日本語版ではハイパーリンクは原則として削除した。読者の皆様には不便をおかけするが、ご理解いただければ幸いである。

今回の日本語訳全体の編集は全体のページ数が膨大であるため、大変な作業となってしまいました。編集作業を担当いただいた、JEITA 内 STRJ 事務局の進藤淳二さん、関口美奈さんに大変お世話になりました。厚くお礼申し上げます。

より多くの方に ITRS をご活用いただきたいとの思いから、今回の翻訳作業を進めました。今後とも ITRS と STRJ へのご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

2012 年 5 月  
訳者一同を代表して  
電子情報技術産業協会 (JEITA) 半導体部会 半導体技術ロードマップ専門委員会 (STRJ) 委員長  
石内 秀美 (株式会社 東芝)

## 版權について

# ORIGINAL (ENGLISH VERSION) COPYRIGHT © 2011 SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION

All rights reserved

ITRS •SEMATECH, Inc. , 257 Fuller Road, Albany, NY 12203 • <http://www.itrs.net>  
Japanese translation by the JEITA, Japan Electronics and Information Technology Industries  
Association under the license of the Semiconductor Industry Association

### ー引用する場合の注意ー

原文(英語版)から引用する場合： ITRS 2011 Edition page XX, Figure(Table) YY  
この日本語訳から引用する場合： ITRS 2011 Edition (JEITA 訳) XX 頁,図(表)YY  
と明記してください。

---

#### 問合せ先：

一般社団法人 電子情報技術産業協会  
半導体技術ロードマップ専門委員会 事務局  
電話: 03-5218-1068 電子メール: [roadmap@jeita.or.jp](mailto:roadmap@jeita.or.jp)

## TABLE OF CONTENTS 歩留り改善 (YIELD ENHANCEMENT)

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| 概要 .....             | 1                      |
| 困難な技術課題 .....        | 3                      |
| 歩留り習熟 .....          | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| 必要とされる研究 .....       | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| 技術的要求 .....          | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| 歩留りモデルと装置許容欠陥数 ..... | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| 欠陥検出と特徴付け .....      | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| ウェーハ環境汚染制御 .....     | 5                      |
| 解決策候補 .....          | 17                     |
| 歩留りモデルと装置許容欠陥数 ..... | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| 欠陥検出と特徴付け .....      | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| ウェーハ環境制御 .....       | 17                     |

### List of Figures

|            |                                                                         |                        |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Figure YE1 | General Test Methodology for Ultrapure Water .....                      | 10                     |
| Figure YE2 | Yield Model and Defect Budget Potential Solutions .....                 | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| Figure YE3 | Defect Detection and Characterization Potential Solutions .....         | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| Figure YE4 | Wafer Environmental and Contamination Control Potential Solutions ..... | エラー! ブックマークが定義されていません。 |

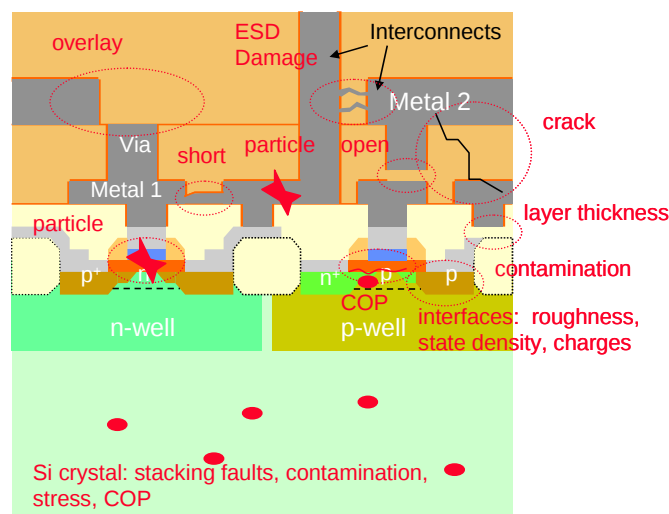
### List of Tables

|           |                                                                                                    |                        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Table YE1 | Definitions for the Different Interface Points .....                                               | 2                      |
| Table YE2 | Yield Enhancement Difficult Challenges .....                                                       | 3                      |
| Table YE3 | Defect Budget Technology Requirement Assumptions .....                                             | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| Table YE4 | Defect Inspection on Pattern Wafer Technology Requirements .....                                   | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| Table YE5 | Defect Inspection on Unpatterned Wafers: Macro, and Bevel Inspection Technology Requirements ..... | エラー! ブックマークが定義されていません。 |
| Table YE6 | Defect Review and Automated Defect Classification Technology Requirements .....                    | エラー! ブックマークが定義されていません。 |

# 歩留り改善 (Yield Enhancement)

## 概要

ほとんどの産業界では、歩留は、生産可能な製品数に対する販売可能な製品数の割合として定義されてきた。半導体業界においては、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。本章で扱う対象は、フロントエンドプロセスの歩留に限定される。YE 章では、生産ライン歩留、アセンブリ／パッケージング歩留、ならびに最終テストの歩留については議論しない。歩留改善 (YE) 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 および Flash 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。



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。イオン注入、エッチング、成膜、平坦化、洗浄、リソグラフィー等の工程で、歩留低下を引き起こす不良が観察される。歩留低下を引き起こす汚染、メカニズムについて、いくつかの例を次に挙げる。  
 a) 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。  
 b) スクラッチ、クラックおよびパーティクルのようなプロセス中で発生した欠陥、重ね合わせ不良、およびストレス。  
 c) 結果として例えば、不純物分布や膜厚を変動させるようなプロセス変動。  
 d) マスクからウェーハにパターン変換される際に生じる設計値のズレは、レイアウトや寸法のズレ、変動となって現れる。  
 e) 膜中、半導体基板中を拡散する元素。

欠陥の特定、および歩留と欠陥の適切な関連付けは、歩留改善に必須である。この関連付けは、特に重要である。なぜなら、必ずしもすべての欠陥が、デバイス特性を変動させたり、デバイスや集積回路を不良にするわけではないからである。それゆえに、YE 章では、プロセスや使用材料に許容される汚染の許容限界値を明らかにするだけでなく、装置内で発生する粒子状汚染について予測される許容数を示す。根本原因の解明のために用いられる欠陥検出／欠陥分類装置の仕様については、欠陥や不良の検出と特徴付けに関する技術的要求事項の節で述べる。

YE 章では、次の 2 つのトピックスに焦点を当てている。“ウェーハ環境汚染制御 (WECC: Wafer Environmental Contamination Control)” および “検査、分析、特徴付け (CIA: Characterization,

## 2 歩留り改善

Inspection and Analysis)”。これら 2 つのトピックスは、フロントエンドプロセス技術、配線プロセス、リソグラフィ、計測技術、設計、プロセスインテグレーション、テスト、および工場基盤技術と横断的に取り扱うべきである。

ウェーハ環境汚染制御 — プロセス流体およびガス不純物レベルの範囲は、近い将来の変更は必要とは考えられていない。しかしながら、新材料、新ブリカーサー導入により、継続的検討を要する。供給地点からプロセス地点までの汚染の可能性の明確化により、供給元の必要な制御システムが決まるだろう。純度を定めるにあたり、供給元、例えば薬液やガスの供給地点(POS)から、これら材料がウェーハに接触する地点、例えばプロセス地点までの経路(POP)にはいくつかの箇所がある。このことは、表 YE3 に示すデータを含めて、プロセス流体の純度を議論する上で、少なからぬ混乱やあいまいさを招いている。表 YE1 に、主な流体の取り扱いや測定位置を、プロセス流体を供給する典型的なシステムに沿ってまとめた。この表は、異なる地点での特性や要求を議論する上での共通言語のひとつの形である。経路に関する詳細な情報に関しては、半導体装置材料国際標準(SEMI Standard)のような補足資料や参考文献に書かれている。

Table YE1 Definitions for the Different Interface Points

|                      | POS<br><i>Delivery Point<br/>of Gas/Chemical<br/>Supplier</i> | POD<br><i>Outlet of Central<br/>Facility System</i>             | POC<br><i>Submain or<br/>VMB/VMP<br/>Take off<br/>Valve</i> | POE<br><i>Entry to Equipment<br/>or Sub Equipment</i>                                                       | POU<br><i>Entry to the Process<br/>Chamber</i>                                                                              | POP<br><i>Contact with Wafer</i>                                                          |
|----------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Interfaces</i>    | <i>SEMI Standards<br/>Focus Area</i>                          | <i>ITRS Factory Integration Facilities<br/>Group Focus Area</i> |                                                             | <i>ITRS Factory Integration Equipment Group<br/>Focus Area</i>                                              |                                                                                                                             | <i>ITRS Front End<br/>Processes,<br/>Lithography,<br/>Interconnect TWG<br/>Focus Area</i> |
| Ultrapure<br>water   | Raw water                                                     | Outlet of final filtration<br>in UPW plant                      | Outlet of<br>submain take<br>off valve                      | Inlet of wet bench<br>or subequipment                                                                       | Inlet of wet bench<br>bath, spray nozzle, or<br>connection point to<br>piping, which is also<br>used for other<br>chemicals | Wafer in production                                                                       |
| Process<br>chemicals | Chemical<br>drum/tote/bulk<br>supply                          | Outlet of final filtration<br>of chemical<br>distribution unit  | Outlet of<br>VMB valve                                      | Inlet of wet bench<br>or intermediate<br>tank                                                               | Inlet of wet bench<br>bath or spray nozzle                                                                                  | Wafer in production                                                                       |
| Specialty<br>gases   | Gas cylinder or<br>bulk specialty<br>gas systems              | Outlet of final filtration<br>of gas cabinet                    | Outlet of<br>VMB valve                                      | Inlet of equipment                                                                                          | Inlet of chamber<br>(outlet of MFC)                                                                                         | Wafer in production                                                                       |
| Bulk gases           | Bulk gas<br>delivered on site<br>or gas generator             | Outlet of final<br>filtration/purification                      | Outlet of<br>submain take<br>off valve or<br>VMB valve      | Inlet of equipment/<br>subequipment                                                                         | Inlet of chamber<br>(outlet of MFC)                                                                                         | Wafer in production                                                                       |
| Cleanroom<br>and AMC | Outside air                                                   | Outlet of make-up air<br>handling unit                          | Outlet of<br>filters in<br>cleanroom<br>ceiling             | Inlet to mini-<br>environment or sub<br>equipment for<br>AMC, outlet of the<br>tool filter for<br>particles | Gas/air in vicinity to<br>wafer/substrate                                                                                   | Wafer/substrate in<br>production (AMC/<br>SMC)                                            |

POD—point of delivery POC—point of connection POE—point of entry POU—point of use VMB— valve manifold box  
VMP— valve manifold post UPW—ultra pure water MFC—mass flow controller AMC—airborne molecular contamination  
SMC—surface molecular contamination

検査、分析、特徴付け — 縮小を続ける物理的なデバイス寸法と該寸法下での欠陥は、たえず検出および許容可能なコンタミネーションに新しい課題を投げかける。ウェーハエッジの状態は、プロセスばらつきやデザインと同様に、歩留りにかなり影響を与える事が確認された。高スループット下でも最高感度を発揮する欠陥検出、欠陥レビュー、欠陥分類の各技術開発は、コスト効率のよい製造のために極めて重要で

ある。さらに、効率的な製造の為には、環境及びウェーハ表面のコンタミネーションをモニタリングする適切な機器が必要である。設備、設計、プロセス、テスト、および工程内データと歩留との間の相関を見出す為の自動化された知的な分析及びアルゴリズムが、根本原因分析を強化して迅速な歩留まり学習を可能にするために、開発されなければならないだろう。

## 困難な技術課題

歩留り改善の章の困難な技術課題は、YE2 表に要約されている。現在最も重要な技術課題は、複数種類の致命欠陥を検出することと S/N 比であろう。それは高い補足率で複数種類の致命欠陥を検出すると同時に分類すること、低 CoO であること、高スループットであることが課題である。さらに大量の擬似および偽欠陥の中から、歩留りに関係する欠陥を同定することに挑戦する。次に重要な課題として、3D 検査の要求が認定された。これは高アスペクト比の構造を検査でき、かつボイドや埋もれた欠陥、表面下部の欠陥を必ず検出する能力を持つ検査ツールが必要となる。高速で費用対効果のある検査ツールの要求も残っている。高速で費用対効果のある 3D 検査ツールの必要性は、3D 欠陥の種類の増加とともに重要となってくる。2011 年に“特性評価、検査、分析”トピックの目的範囲が変更されたことにより新たな課題：表面有機汚染物の検出が追加された。現在のところ工場内で表面における不揮発性有機物の検出および同定は不可能であり、ラボスケールの分析機器も存在しない。

歩留り改善のグループは、その他の直近の課題を以下と位置付けている。

- ・プロセスの安定性 vs. 絶対的な汚染レベル
- ・ウェーハエッジとベベルのモニタリングと汚染制御

2011 年に、将来最も重要となる課題として見えない欠陥とプロセスばらつきの定義が挙げられている。使用薬剤の汚染の種類やレベルと歩留りとの相関をとり、管理限界を定める為の、データ、TEG、手法が求められている。この技術課題の核心は、ウェーハ歩留りに対する各汚染源の相対的重要度、歩留りや特性への影響を評価する標準テストと最大のプロセス変動(管理限界)である。基本的な技術課題は、主要プロセス中の不純物濃度と歩留り、信頼性、性能との相関を取る事である。この相関は、汚染の限界基準を更に厳しくする事が必要かどうかを決めるだろう。技術課題は、プロセス使用材料の増加により複雑さが増加するので、最も敏感なプロセスでの研究を選択する事が、意味のある進歩に繋がるだろう。

さらに下記の長期の技術課題が認定された。

- ・インラインでの欠陥の特徴付けと解析
- ・次世代リソグラフィー

Table YE2 Yield Enhancement Difficult Challenges

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |

#### 4 歩留り改善

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <i>Difficult Challenges ≥ 16 nm</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <i>Summary of Issues</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p><i>Detection and identification of Small Yield Limiting Defects from Nuisance - Detection of multiple killer defects and their simultaneous differentiation at high capture rates, low cost of ownership and high throughput. It is a challenge to find small but yield relevant defects under a vast amount of nuisance and false defects.</i></p>                                                                                                                    | <p><i>Existing techniques trade-off throughput for sensitivity, but at expected defect levels, both throughput and sensitivity are necessary for statistical validity.</i></p> <p><i>Reduction of inspection costs and increase of throughput is crucial in view of CoO.</i></p> <p><i>Detection of line edge roughness due to process variation.</i></p> <p><i>Electrical and physical failure analysis for killer defects at high capture rate, high throughput and high precision.</i></p> <p><i>Reduction of background noise from detection units and samples to improve the sensitivity of systems.</i></p> <p><i>Improvement of signal to noise ratio to delineate defect from process variation.</i></p> <p><i>Where does process variation stop and defect start?</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <p><i>Non-Visual Defects and Process Variations – Increasing yield loss due to non-visual defects and process variations requires new approaches in methodologies, diagnostics and control. This includes the correlation of systematic yield loss and layout attributes. The irregularity of features in logic areas makes them very sensitive to systematic yield loss mechanisms such as patterning process variations across the lithographic process window.</i></p> | <p><i>Systematic Mechanisms Limited Yield (SMLY), resulting from unrecognized models hidden in the chip, should be efficiently identified and tackled through logic diagnosis capability designed into products and systematically incorporated in the test flow. It is required to manage the above models at both the design and manufacturing stage. Potential issues can arise due to:</i></p> <p><i>a) Accommodation of different Automatic Test Pattern Generation (ATPG) flows.</i></p> <p><i>b) Automatic Test Equipment (ATE) architecture which might lead to significant test time increase when logging the number of vectors necessary for the logic diagnosis to converge.</i></p> <p><i>c) Logic diagnosis runs time per die.</i></p> <p><i>d) Statistical methodology to analyze results of logic diagnosis for denoising influence of random defects and building a layout-dependent systematic yield model.</i></p> <p><i>Test pattern generation has to take into account process versus layout marginalities (hotspots) which might cause systematic yield loss, and has to improve their coverage.</i></p> <p><i>Methodology for employment and correlation of fluid/gas types to yield of a standard test structure/product</i></p> <p><i>Relative importance of different contaminants to wafer yield.</i></p> <p><i>Define a standard test for yield/parametric effect.</i></p> |
| <p><i>Process Stability vs. Absolute Contamination Level – Including the Correlation to Yield Test structures, methods and data are needed for correlating defects caused by wafer environment and handling with yield. This requires determination of control limits for gases, chemicals, air, precursors, ultrapure water and substrate surface cleanliness.</i></p>                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p><i>Detection of organic contamination on surfaces – The detection and speciation of non volatile organics on surfaces is currently not possible in the fab. There is no laboratory scale instrumentation available.</i></p>                                                                                                                                                                                                                                            | <p><i>A possible work around is the use of NEXAF at a synchrotron radiation facility.</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <i>Difficult Challenges &lt; 16 nm</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <i>Summary of Issues</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Next Generation Inspection - As bright field detection in the far-field loses its ability to discriminate defects of interest, it has become necessary to explore new alternative technologies that can meet inspection requirements beyond 13 nm node.                                                                                                                                                                                                                           | Several techniques should be given consideration as potential candidates for inspection: high speed scanning probe microscopy, near-field scanning optical microscopy, interferometry, scanning capacitance microscopy and e-beam. This path finding exercise needs to assess each technique's ultimate resolution, throughput and potential interactions with samples (contamination, or degree of mechanical damage) as key success criteria.            |
| In - line Defect Characterization and Analysis – Based on the need to work on smaller defect sizes and feature characterization, alternatives to optical systems and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy systems are required for high throughput in-line characterization and analysis for defects smaller than feature sizes. The data volume to be analyzed is drastically increasing, therefore demanding for new methods for data interpretation and to ensure quality. [1] | Data volume + quality: strong increase of data volume due to miniaturization<br>The probe for sampling should show minimum impact as surface damage or destruction from SEM image resolution.<br>It will be recommended to supply information on chemical state and bonding especially of organics.<br>Small volume technique adapted to the scales of technology generations.<br>Capability to distinguish between the particle and the substrate signal. |
| Next generation lithography - Manufacturing faces several choices of lithography technologies in the long term, which all pose different challenges with regard to yield enhancement, defect and contamination control.                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

[1] Cross-link to Metrology chapter

## ウェーハ環境汚染制御

ウェーハ環境汚染制御に関する要求は、表 YE3 に示されるように製造原料あるいは環境によって分類される。

**ウェーハ環境制御** – ウェーハ環境制御には、ウェーハがクリーンルーム大気に曝されているか、POD や FOUP 中に格納されているかによらず、常にウェーハを取り巻く空間が含まれる。制御すべき雰囲気汚染の一覧表が拡大するにつれ、計測能力も向上しなくてはならない。経済的で、正確、再現性がありリアルタイムのパーティクル以外の汚染を測定できるセンサーの必要性が増している。プロセスの敏感性が増すとともに、ウェーハ輸送や格納環境への不活性環境の使用が拡大する。この不活性環境が最初に必要となるプロセスとして、ゲート酸化前、コンタクト、シリサイド、Cu 配線、レチクル保管環境が上げられる。加えて、不活性環境を使うことにより、真空ロードロック装置への水分の持込を抑制でき、汚染やロードロックの真空引き回数を削減できる。密閉のパージシステムが既にありまた発展している一方、洗浄装置のように不活性雰囲気が必要とされる装置には困難な課題がある。ウェーハ隔離技術が発展するにつれ、キャリアや容器の設計や材料選定がウェーハを環境から隔離する上で、また、汚染そのものを出さないという点で非常に重要になる。加えて、材料と設計はプロセス中のクロス汚染を促進してはいけない。密閉技術、低アウトガスで吸着のない材料の開発が効果的なウェーハやレチクルの隔離配置にとって鍵となる。

**気中分子汚染** – クリーンルーム、ウェーハ製造装置、処理済みのウェーハ、ウェーハケースで使用される構造材料からの脱ガスは、排気不足とプロセスで使用する化学薬品からの蒸発物と並んで、気中分子汚染(AMC)の主なソースである。特に密集度の高い領域では、空調された空気も AMC の重大な原因となる。低濃度の気中汚染物(例 一酸化炭素、酸素)と同様に、酸素や水蒸気も AMC 対象物質の一部と考えられる。空気中の酸の蒸気は HEPA フィルターからボロンが出てくる現象と同様に腐食の現象と関連している。アミンが DUV 光露光用レジスト解像度に影響を与える現象は、AMC がウェーハプロセスに影響を与えるよく知られた例である。わずかな数分子層の炭化水素膜は、特に前工程において工程の制御を難しくさせる。AMC の影響はより深刻になると考えられる。このことはデバイスサイズが小さくなることによるだけでなく、将来の技術ノードのために新しい化学物質やレシピを導入することによっても引き起こされる。AMC がウェーハ表面やバルク材料に欠陥を作るもののほかに、歩留り向上グループ員は、レチクル、測定装置、露光装置などの生産装置に対する AMC の影響が原因となる欠陥や生産性の低下問題に取り組んでいる。

AMC は多くの場合、影響範囲として、極めてダイナミックな現象である。AMC の制御とは主に AMC の放出を防ぐことに取り組むことであり、そのためには、しっかりした発生源の制御が欠かせない。クリーンルームの中で、ppt レベル(体積換算)で AMC を測定できる、より良い AMC モニター装置が明らかに必要である。SAW デバイスと APIMS は低濃度の AMC 測定に使われてきた。多様なオンラインの方法や設備機器が必要とされ、将来入手可能になることが期待されている。建築材料や FOUP の構成材料からの気中分子汚染物の脱ガスに関しては多くの研究がなされ、材料選択のガイドラインとして使われているが、重要な工程に関しては、さらにポッド内の真空引きと窒素パージの必要性が、フープ経由で他の工程から汚染が広がることを減らすためにさらに調査されている。新しいプロセスに対する AMC の影響に関しては、すべてのプロセスインテグレーションの観点から検討する必要がある。飛躍的で革新的な技術が、製造ラインに導入されているということを特に述べておきたい。例えば将来のリソグラフィーのシステムは真空処理を必要とするので、クリーンルーム環境の新たな AMC 制御を追加するようなことは期待されていない。しかしながら、今後使用を検討している化合物は、装置内部で新鮮な空気とパージガスによる処理をすることが必要となる。重要な不純物の詳細な定義は AMC 定義に規定されている。

最も重要な用途であるリソグラフィー工程に対して、いくつかの理由から温度と湿度の規格が表 YE3 に導入された。

- 1) 最も厳しい要求値は、環境制御室によって守られているリソグラフィー工程によって決定される。表 YE7 の規格は、それぞれ個々の環境制御室に導入される空気の状態を反映している。ここでは特に最大の時間変動幅が重要であり、その変動は環境制御室で補償されなくてはならない。POP において  $\pm 0.03\text{K}$  以下の規格が維持される。
- 2) しかしまた、塗布/現像装置のトラックにおいては、レジストに対する安定した状態を維持するために温度と湿度の規格は保証されなくてはならない。
- 3) 温度変動は、軽微な温度変動でも異なる熱膨張係数のために、ステッパー自体とウェーハステージ、レンズカラム間のずれを生じさせるのでステッパー自体にとっても重要である。ステッパーは温度変動後に安定するまで一週間程度必要とする。
- 4) 別の重要な要求値は、レーザー光(空気の密度は温度と湿度によって変わる)に依存している計測装置と、ずれが重要となる計測によって決定される。

重要な区域の中での異なる場所間の温度と湿度の安定性はそれほど重要ではない。その他の区域においてもまた、温度と湿度の変動はそれほど厳しい制限で制御する必要は無いだろう。なぜなら、表面の自然酸化膜形成や位置合せに影響を与えるからである。会社によっては、温度や湿度の制御とそれに関連する分離を簡単にすると共に、クリーンルームに柔軟性を持たせるために重要領域と非重要領域の仕様を変えないという選択をしているところもある。

これらの仕様は変動する仕様であり、設定値は広い範囲で選ぶことができる。最近の工場間のベンチマークによると、温度は  $19.5$  から  $24^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度は  $35$  から  $48\%$  の値を示している。これには異なる決定要因がある。温度の設定値は快適度と気候条件、そしてそれに伴うエネルギー消費に基いて選択される。相対湿度の設定値は低湿度における静電気や高湿度における腐食や自然酸化膜形成を考慮して決定される。AMC フィルターの能力も湿度に依存する。AMC 制御に関する要求値と同様に温度/湿度制御が必要なプロセスに、リソグラフィー用のエキシマレーザーの設置場所がある。特にそれがクリーンルームではなくサブファブに設置されている場合である。

## 表 YE3 の新たな構成

表 YE3 の改訂では、直接的なウェハ環境およびマスク環境、エンクロージャ(FOUP、レチクルポッド)を考慮している。クリーンルーム制御、(ベアの)ウェーハおよびマスク保管庫、エンクロージャのような高纯净化された保管環境からなる実際の製造コンセプトに、表の形式と内容を合わせた。リストに挙げられた

各々のプロセスは、クリーンルーム環境の情報、装置内部環境、FOUP、レチクルポッドまたはベアの保管環境のスペックに分かれている。クリーンルーム環境は、クリティカルなプロセスステップへの POE の状態として定義されており、AMC 防止および削減に関連するさらなる装置関連対策を含む場合もあり、また、適切なプロセス制御のために制御された導入口の状態を要求している場合もある。FOUP やレチクルポッドの内部環境スペックは、クリーンルーム環境の汚染に影響を受けるだけでなく、残留している活性な材料からのアウトガスや内壁に付着した AMC の再蒸発に強く依存する。透明性と比較しやすさのために、プロセスごとに、クリーンルーム環境とコンテナ (FOUP とレチクルポッド) のスペックを併記してある。2011 年に作成した表 YE3 の AMC スペックの改訂は、フロントエンドの製造会社、研究機関、大学の情報、欠陥と歩留に関する公知情報の検討に基づいている。AMC スペックの一覧では、歩留要求と工場統合プロセスに許容される材料と装置の実際の標準的な待機時間や処理時間におけるクリーンルームのスペックとウェーハ/レチクル環境を統合したコンセプトでの推奨となっている。

| <u>Gate/Furnace area wafer environment (cleanroom FOUP ambient/tool ambient)</u>     |  |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------|
| Total metals [8] (E+10)                                                              |  | <u>&lt; 10 Atm/cm<sup>2</sup>/Week</u> |
| Dopants [4] (E+10; front end of line only)                                           |  | <u>&lt; 10 Atm/cm<sup>2</sup>/Week</u> |
| Volatile Organics (w/ GCMS retention times ? benzene, calibrated to hexadecane) [31] |  | <u>20000</u>                           |
| <u>Gate/Furnace area wafer environment (FOUP inside)</u>                             |  |                                        |
| Total metals [8] (E+10)                                                              |  | <u>&lt; 0,5 atm/cm<sup>2</sup></u>     |
| Dopants [4] (E+10 front end of line only)                                            |  | <u>&lt; 0,5 atm/cm<sup>2</sup></u>     |
| Volatile Organics (w/ GCMS retention times ? benzene, calibrated to hexadecane) [31] |  | <u>20000</u>                           |
| SMC (surface molecular condensable) organics on wafers, ng/cm <sup>2</sup> /day [12] |  | <u>NA</u>                              |
| Total SM (surface metals) on wafer, E+10 atoms/cm <sup>2</sup> /day                  |  | <u>&lt; 0,5 atm/cm<sup>2</sup></u>     |

表 YE3 の構成と一覧の例 (プロセス 炉/熱処理): クリーンルーム環境制御の AMC スペックは、FOUP 内のウェーハ環境に推奨される AMC スペックと併記されている。一覧の値は、フロントエンドの製造における欠陥分析と公的研究機関の科学研究から設定されている。

## ファクトリーインテグレーション(FI)に関連した新しい気中分子汚染(AMC)トピックス(AMC の組織化した概念)

FOUP はプロセス装置からプロセス装置へ行くまでの 25 枚のウェーハの保管と搬送をするためのプラスチック容器である。保管中に、ウェーハは FOUP 内で前のプロセスの薬品や副生成物をガスとして放出するかもしれない。結果として、FOUP 内の数種類の問題となる AMC の濃度はクリーンルーム内よりも数桁高くなる場合がある。

FOUP はそれ自体の製造プロセス起因の残留物のため、また、さらに脱ガスするであろう汚染されたウェーハから発生する AMC を吸着する可能性があるので汚染源となりうる。AMC 起因の欠陥は FOUP 内からの問題となる汚染、基盤の種類と保管時間の組み合わせの結果である。いくつかの欠陥はまた、湿度と温度の状況に関連している。その結果、FOUP 内の汚染の測定と制御は IDM とファンダリーの基本的な技術課題である。

証拠となるウェーハは表面分子汚染(SMC)と特徴的な欠陥を結びつけるのに用いられている。表面濃度は通常、分子の最大許容数/cm<sup>2</sup>として表される。異なる分子の付着確率は文献中から見出され、SMCと空気中の AMC 濃度の関係を私たちに手助けしてくれる。ウェーハ上の表面欠陥を生み出すであろう AMC はまた、温度と湿度が与えられた曝露時間に依存している。一般的な SMC と AMC の関係式を以下に示す。 $C = N / (s \times V \times t)$ , C は空気中の AMC 濃度, N はウェーハ上の SMC 濃度, s は付着確率, V は AMC の平均速度そして t は曝露時間である。YE3 表は FOUP 内に 24 時間曝露したときの ppt(v)で推奨された AMC 濃度を報告している。より短い曝露時間の場合は、新規の AMC 値は上述の式から計算される。この単純な結果は空気中の許容濃度が短い曝露時間でより高いことを示している(この式による直線関係から)。付着確率は曝露時間が違う場合に正確に一定ではなく、このアプローチは上記の汚染の動的な法則を使用したより進化した理論を簡素化したバージョンを主張しているのみである(詳細は文献で見つけることが出来る)。

歩留向上(YE)グループは、FOUP 汚染に関係した異なる問題に取り組んでおり、それゆえ、解決策候補を描写している新しい表を提案している。ファクトリーインテグレーションはサイクルタイム、プロセスの待ち時間、設計と消費量を含むすべてのプロセスフローに対処している。結果として、FOUP 内の汚染の測定と制御の統合は YE と FI の間の一般的なプロジェクトとして取り扱われた。この一般的な仕事の枠の中で、FI はサイクルタイムとスループットに関してそれぞれの解決策候補の有効性を評価する役割を持っている。

2011 年版では、YE は以下の主要な三個の解決策候補を定義した。

- ・新しい FOUP からの脱ガス
- ・生産中の FOUP からの脱ガス
- ・FOUP 内でのウェーハ上のクロスコンタミネーション

**プロセスに影響を与える材料** — Cuメッキ液、CMP スラリー、high/low- $\kappa$ 絶縁膜や他の薄膜材料の CVD 材料のような新規材料中の不純物規格について理解するために、さらに実験による調査が必要である。何年もの間、パーティクルの大きさという概念は、歩留りに影響を与えるかどうかの判断に用いられてきた。この概念は、パーティクルがその物理的な大きさによってだけではなく、化学組成によっても歩留りに影響を及ぼすことから再考されるべきである。それゆえ許容されるパーティクル濃度は、セルサイズのような製品パラメータにも依存し、従って、FEP の表面処理グループの計算モデルによって導かれる表面パーティクル濃度にも合せられる。

**超純水** — 25℃で 18.2 M $\Omega$ -cm の比抵抗を持ち、金属は数 ppt、無機アニオンやアンモニアは 50ppt 以下、TOC (全酸化可能炭素)や溶解/コロイダルシリカは 1ppb 以下のものが一般的に超純水と考えられている。パーティクルレベルは現在入手可能な最高レベルの超濾過技術を用いることにより低減している。バクテリアは配管等の内表面や少量ではあるが水中に存在しているが、非常に低いレベルに制御されており、1cfu/L 以下である。Table YE3 に提示されている 2011 年のロードマップの値は最先端デバイスを製造する工場で現在使用されていて、ベンチマーク調査によって確認された代表的な超純水の水質の値となっている。2011 年版を超える更に厳しい基準値は、製造プロセスの要求値から改善が必要とされる証拠がある場合のみ提案される。一般的に超純水は半導体製造プロセスの中で使用可能な最もクリーンな流体といえる。それ自体がプロセス歩留りに悪影響を与えるというようなデータはそれほど多くない。よって、超純水のロードマップは比較的变化がないものとなっている。超純水グループでは、ギブス自由エネルギーを使った付着モデルを使用して、様々なプロセス条件の中で、重要な不純物元素がウェーハに付着する可能性を表そうと試みている。超純水グループは薬品グループと密接に協力し、水中の既知の不純物に起因するリスクを評価するための故障モード影響解析(FMEA)を発展させてきた。この試みは、無機の汚染物質に対しては、成功した。2011 年に超純水グループは、同様の手法を有機物に適用する事を開始した。[超純水に対する要求に関しては補足書類で議論する。](#)

Table YE3 の超純水の部分においては、いくつかのパラメータを汚染物というよりプロセスの揺らぎと考えている。いくつかのパラメーターについて、ウェハ環境の安定度が汚染レベルより重要なことは明白である。ある半導体製造メーカは溶存酸素を現在そのように取り扱っているが、他社ではそれを汚染物質と考えている。温度や圧力の安定性も引き続き重要であり、特に液浸リソグラフィでは特に温度が重要である。

**超純水中の汚染有機物** — ここ数年、超純水中の汚染有機物が半導体デバイスにどのように影響するのかの関心が高まってきた。過去には、汚染有機物は全酸化可能炭素や全有機炭素として測定されてきた。この測定方法では、有機成分がどのようなタイプか、種々のウェハ表面とどう反応するのか、その反応が、半導体デバイスにどう影響するのかは判らない。現在、ITRS では超純水中の汚染有機物を、ウェハ表面と極性結合する能力を基にして区分けする事を考えている。この有機物の区分は、サブグループを決定するのに故障モード影響解析(FEMA)を用いて定量化される。

- ・極性プロトン型有機物(Polar Protic Organic)は、ヒドロキシル類の酸素原子への水素結合またはアミン類の窒素原子への水素結合のいずれかを持っている。この性質は、ゲート、トンネルまたは自然酸化膜を含む全ての酸化表面に水素結合を生じさせる重要な能力に関係してくる。また、極性プロトン型有機物は、自由電子対により Cu, Al, W, B などの陽イオンとも結合する事が出来る。極性プロトン型有機物は、比較的高い誘電率と極性を持つ。

- ・極性非プロトン型有機物(Polar Aprotic Organics)は、炭化水素の結合か芳香環に接続した活性酸素を持っている。この活性酸素は、Al, Cu, Si, W, Ca, Ge を含む金属表面と極性結合を生じ、それにより、金属酸化物として付着する。この反応は酸化表面で生じ、ベアー金属表面では反応性が低い。極性非プロトン型有機物は、一般的に中程度の大きさの誘電率と極性を持つ。

- ・非極性有機物(Non-Polar Organics)は、デバイスに与える直接的な影響は非常に小さい。ファンデルワールス力は比較的弱く、容易に極性や共有反応に圧倒されてしまうが、非極性有機物はこのファンデルワールス力により、外部素材(FM)として親水性または疎水性ウェハ表面に付着する。

例えば、酸化層中の酸素原子との水素結合により生じた極性基を含む、超純水中の極性プロトン型有機物成分により、自然酸化膜、ゲート酸化膜、トンネル酸化膜の様な半導体デバイスの酸化層が、極性プロトン型有機物成分により影響される事が確認されている。酸化層中に有機物が存在すると、湿式エッチング工程においてレジストの付着不良やアンダーカットの原因となる。これは、近接した金属配線のショートを招くウィンドウやビアのサイズ増大の原因となる。

今後数年間の試験解析を行うことにより、半導体デバイスの不良と有機成分の量とタイプの関係が決定できる事が重要である。有機酸や有機アルカリなどのさらに細かい区分けを行うための調査が 2012 年まで実施される。シリコン、窒素、硫黄、リン、ハロゲンを含む有機成分についても同様である。

超純水の汚染に関する品質レベルは、その品質がどこで要求され、どこで測定されるかという視点を忘れてはならない。測定箇所には 供給ポイント(POD)、装置接続ポイント(POE)、ユースポイント(POU)がある。POD とは超純水製造システムの最終処理ステップの直後であり、POE は装置との接続点、POU は装置の内部である。詳細な測定箇所の記述は Table YE1 で参照できる。2007 年版ロードマップでは Table YE3 に示すように、超純水の水質は POE で規定している。超純水の水質はこれら 3 点の間で特に POE と POU 間で変化する可能性があり、水質を完全に維持するための特別な注意が必要となる。さらに、正確な分析結果を得るためにサンプリング技術も重要である。超純水の規格を POE から POU に移行すると、サンプリング方法がより難しく、高コストになってくる。大抵のベンチマークのデータは POD や POE で収集され、Table YE3 のパラメータの基となる。汚染レベルが POU にまで拡大されてきたが、これは、半導体プロセス装置が最適設計され、適切な SEMI 基準に従って液体の純度を維持しながら運用されていると想定した時の技術的な判断に基づいている。

オゾン水に関しては、一般的にプロセス装置において適用される希薄薬品プロセスの一種であるとみなして、このロードマップでは取り扱わない。超純水が液体レンズとして使用される液浸リソグラフィプロセスは、

温度に極めて敏感である。従来、超純水に懸念されていた、1ppb レベルの有機物はレンズのヘイズ(曇り)には影響しない事が、試験により確認された。

**超純水のリサイクル** — 超純水のリサイクル—資源の最適化を促進するために、超純水使用効率の改善が一般的に求められている。システムを通してより多くの超純水をリサイクルするようになり、超純水の品質が維持されていることを保証するため、処理方法や分析方法を含め、コスト効率の高い技術が必要とされている。適切なリサイクル計画の実行は、利益をもたらすだけでなく、“よりきれいな”給水の流れを使用することにより最終的な水質の改善ができることを示している。更なる情報と要求項目は [ESH の章](#)に記載されている。

**超純水の測定方法** — 超純水中の汚染を監視するための一般的な試験方法は Figure YE1 に示されている。過去数年にわたり ITRS の超純水チームは超純水の品質を決定するために、多くの最新の超純水システムをベンチマークしてきた。2007 年のベンチマークでは、不揮発性蒸発残渣モニターと新鋭サンプリング技術を利用したパーティクル SEM 測定も実施した。この活動により、いくつかの測定方法が超純水中の汚染を定量するのに相応しくないことが明らかになった。次の分析方法は現在の超純水中の汚染レベルに対して感度が無い:比抵抗、TOC、無機アニオン、有機イオンと有機物。有機物の化学形態別分析はこれらの方法に限定されていた。次の方法の感度は現在のところ適切である:生菌、溶存ガス、金属。パーティクル計測技術は、必要とされる最小寸法のパーティクルを検出するには感度が不足しているが、UF 膜の欠陥を検出するための貴重なツールでありつづけている。

| <b>Parameter</b>                                  | <b>Measured (POD/POC)</b> | <b>Test Method</b>                       |
|---------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| Resistivity                                       | Online                    | Electric cell                            |
| Viable bacteria                                   | Lab                       | Incubation                               |
| TOC                                               | Online                    | Conductivity/CO <sub>2</sub>             |
| Inorganic anions and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Lab                       | Ion chromatography                       |
| Organic ions                                      | Lab                       | Ion chromatography                       |
| Other organics                                    | Lab                       | Various, e.g., ES TOF, ICP-MS            |
| Reactive silica                                   | Online or lab             | Colorimetric                             |
| Dissolved N <sub>2</sub>                          | Online                    | Electric cell                            |
| Total silica                                      | Lab                       | ICP-MS or GFAAS                          |
| Particle monitoring                               | Online                    | Light scatter                            |
| Particle count                                    | Lab                       | SEM—capture filter at various pore sizes |
| Cations, anions, metals                           | Lab                       | Ion chromatography, ICP-MS               |
| Dissolved O <sub>2</sub>                          | Online                    | Electric cell                            |

ES TOF—飛行時間型エレクトロスプレー装置 ICP-MS—誘導結合プラズマ質量分析装置

GFAAS—黒鉛炉原子吸光光度計

**Figure YE1** General Test Methodology for Ultrapure Water

**超純水と薬液のパーティクル測定** — 問題の定義と目指すもの: 超純水や薬液用のパーティクルカウンターの検出感度の限界は、必要とされる最小パーティクルサイズ(ウェーハ歩留りに重大な影響を及ぼすパーティクルサイズ)の小粒径化に遅れを取ってきている。この考え方は別途議論する必要があるが、パーティクルは物理的寸法によってのみ歩留りに影響するのではなく、その化学的組成がむしろ影響が大きい。例えばスポット状の鉄汚染を考えるとよい。現在測定可能なものより小さなパーティクルを測定することも重要である。これらナノサイズのパーティクル測定は、光散乱効率が低いことにより困難になっている。パーティクル濃度が低いこと現状のパーティクルモニターの試料容量が少ないことにより、試料間の測定値のばら

つきが大きくなってしまふ。適正な測定統計学を持ったより高感度なパーティクル測定方法が、清浄度目標を達成するために必要となる。

感度の問題: 2007 年時点で、市販の最も高感度なパーティクルカウンターは超純水に対して  $0.05\mu\text{m}$ 、薬液に対して  $0.065\mu\text{m}$  である。M. Knotterによる実験で、小粒径のパーティクルほど付着し易いことが示されており、小粒径の方がむしろ影響が大きい。これまでの超純水のためのパーティクルカウンターの感度向上は、レーザー出力の増大により行われてきた。薬液のためのパーティクルカウンターの感度向上は実行できるが、この手法を使った超純水のための更なる感度向上は、大幅なコスト増が予想されるためできそうにない。更に、高コストな解決策によるが計測装置が生産に値することを保証するとは限らない。高い初期投資と増加する資産コストがより高感度な装置の実現の可能性に影響を与える。従って、ITRSの目標を満足させるためには、市販の装置の測定感度以下のパーティクル濃度を予想するための数学的な外挿法が活用されなければならない。この外挿法は液体中のパーティクル数とパーティクルサイズ( $d$ )との間に  $1/d^3$  の関係があると仮定している。ITRSが測定を必要とする最小パーティクルサイズが実際の測定能力から乖離すればするほど、外挿の誤差(計算値と真の値の差)の可能性も高くなる。従って、パーティクル数とパーティクルサイズの間を関係を保証するために、より高感度でパーティクルを測定できる手法を開発することは業界にとって今でも重要なことである。これにより、その関係は信頼性を持って使用され続けることができる。

測定の正確性の問題: プロセス条件が変わっていないことを監視するため、統計的プロセス制御がますます使われるようになってきている。液体純度のプロセス変動が液体の絶対的な純度と同様に歩留りにとって重要になっている。従って、測定されたパーティクル濃度の信頼性を保証するために、測定方法によって十分なパーティクル数を検出することが重要である。測定パーティクル数の信頼度を向上させるためには、他に統計的に有効なパーティクル測定方法やより大容量の試料を測定するパーティクルカウンターの開発が必要である。試料の容量(測定される液体の容量)が試料の測定間隔中に検出されるパーティクルの計測数を決定する。[パーティクルモニタリングについて詳細は補足書類を参照のこと。](#)

表 YE3 のガス/薬品部分の純度トレンドは基本的に一定であるが、特別なプロセスにおいてはさらに高い純度が要求される場合もある。平均的な汚染レベルを低減するよりも、純度のばらつきを低減することによって歩留り向上が達成されることもある。従って、これらのプロセス原料の製造や運搬の過程における汚染レベルの統計的プロセス制御の改善が必要である。

ガスと薬液の概要 — 表 YE3 のガスと薬液に対する推奨される汚染の要求値は、ロードマップにおいて更に要求が厳しくなる製造工程において、装置への接続点(POE)におけるガスや薬液の典型的な品質要求値を示している。多くの用途においては、これらのガスや薬液の汚染の要求値は具体的なプロセス要求値によって決定されることで緩和されるだろう。一方で、より低い汚染レベルによって恩恵を受けると主張するメーカーもある。あるプロセスが、原料の純度範囲やパージ時間などの他のパラメーターの範囲として規定された“ウィンドウ”の中でうまく実施されれば、実際には課せられた純度要求やプロセススループットにはトレードオフが存在するのは当然である。プロセスを“純度のウィンドウ”の上限まで押し進めるには、かなりの時間的投資と他のパラメーターを最適化するための努力が必要であり、その努力を追及することの経済性は、環境によって変わるだろう。汚染レベルを下げることによって得られる利益は、高純度のプロセスガスや薬液で達成された汚染ばらつきの低減のおかげである。この話題については、プロセス用流体の純度を指定するための統計的プロセス制御(SPC)を採用することの要求が詳細に検討される。

プロセス環境の汚染源としては、主として三つの原因がある。一つは供給されたプロセス原料に含まれる不純物である。二つめは供給システムやプロセス自身である。三つめは熱分解や水分のようにたまたま存在している汚染との反応による分解である。これらの汚染源は、供給されたガスや薬品からウェーハ表面

への経路のいたるところに存在する。表 YE1 はプロセス原料とそれらの供給経路系の装置との様々な接点について記述してある。またそこには、ITRS 内や SEMI などの組織の様々な TWG との関連について記述している。これは WECC とこれらの組織との関係を明確にするとともに、プロセス経路に沿った様々なポイントの定義に関するあいまいさを排除している。

POP(プロセスチャンバー内)における純度の測定により、ガスや薬品の品質とプロセス性能の間の最も直接的な関係を提供してくれるが、この測定は、ウェーハ洗浄槽中の液体の性質によって多くの場合、非常に困難である。プラズマプロセス中のパーティクル生成やウェーハからの脱ガスといった例も同様である。後者は多くのプロセスにおいて水蒸気の最も重要な汚染源となり、プロセスに用いる液体からの水分の寄与を目立たなくさせる。POU で測定することにより、プロセスチャンバーに直接入っていくプロセスに用いる液体の品質の最も直接的な情報を得ることができるが、これも多くの通常のプロセスにおいては不可能である。

これらの困難さのため、表 YE3 の値は表 YE1 に示されるプロセス装置への入り口と定義される POE に相当するようになっている。一般ガスや液体に関しては、多くの用途向けに POE の不純物レベルに関して指針を与える十分なデータがある。しかし、これらの流体に関する測定はしばしば POS、POD あるいは POC で行われている。これらの材料については、比較的反応性が少なく、大容量で運搬されるので、POE への推定は一般的に妥当性がある。特殊ガスや反応性の流体の場合、そういった推定には細心の注意を要する。なぜなら、供給量が少ないので汚染の影響に対する感度が増し、また、供給システムの構造材料の劣化や、大気の汚染、熱的な劣化に影響されやすくなるからである。これらの要素は通常の最適な構成や運転の実行により最小になっている。それゆえに POS の規格やそれほどではないにしても POD や POC の測定が最も有効な指針となり、POE と等しいと解釈される。要約すると、全てのガスと液体に対して POE の純度を推奨したいが、実用的には裏付けとなるデータはしばしば POS、POD や POC で収集されてきた。

目標のレベルは 必要不可欠な純度で大量の流体を供給するか、局所的な純化器やろ過器を使うことによって達成される。供給源からのガスの純度を維持するため最低限の注意は払う必要がある。その際、構成部品で生じるパーティクルや水分のアウトガス、不適合な材料から発生する副生成物といった汚染を POS の下流側で発生させてはならない。POU になるべく近い位置でガスのパーティクルろ過を行うことが一般的には望ましい。最も重要な用途に対しては、POU で最高の純度高めたりそれを保証するために局所的な純化器が使用される。そういう場合、そのプロセスに相応しい POC のレベルを追求することや、純化器を“保険”とみなすことが一般的に行われる。純化器を最少にすることや純化器の長寿命化が課題である。

特別な純度の課題は以下で議論されるが、一般的に表 YE3 に記載された純度のレベルが、何世代にもわたる半導体生産には適さない、ということを示唆する客観的な証拠はほとんど無い。歩留り向上は、純度の変動を抑制することで達成できると期待されている。材料自身の統計的プロセス制御(SPC)は、POS での変動を抑えるだろう。POS と POU における純度の不一致は下流側の変動要因のために無くならないだろう。例えば、供給システムにおける流量が減少した時には、脱ガスによる水分汚染が増加する傾向になるようなことである。これらの変動を排除するためには、適切なポイントでの純化(つまり POU での純化(POUP))が必要となる。

主要な一般ガスが表 YE3 に分けて掲載されている。2007 年版ロードマップでは 45nm 以降の不純物要求値の増加を示した。この種の改善はデザインルールが厳しくなるという歴史的な傾向に基づけば予想されたことであろう。しかし、一般ガス全体にわたる改善に対する必要性を支持する客観的な証拠もまたほとんど無い。大きな半導体製造団体の多くの非公式な見解では、一般ガスの大多数に対する現在の純度要求値を越える増加は、45nm 以降のデザインルールでの生産に対応するための必要性は無いことを示唆している。極端な高純度が重要となる非常に特別な用途に対しては、特別な純度等級品や追加の純化が必要とされる。上記に例示したように、下流における POUP も POS ガスの変動を取り除く追加手段として利用される。その結果、表 YE3 は 2005 年版から将来生産されるノードのために計画された段階的な改善

の多くを削除する修正をされてきているが、変更を正当化する特別な情報が確認できるものについては除いてある。

特殊ガスについても、多くの用途分類が具体的なプロセス、すなわちエッチング、成膜、ドーピング、レーザー用途等の特定のプロセスに対する要求をはっきりさせるために追加されているが、状況は同じである。一般ガスと同様に、純度向上に対する客観的な正当性が確認されない限り、表 YE3 の値は現状レベルのままとした。現状の表 YE3 のガスの値に対する変更は少ないが、将来の設計ルールに対応するために必要となる非常に多くの新規材料の導入や、例えば ALD(原子層成膜)のようなプロセスの革新には近接モニタリングが必要となる。[一般及び特殊ガスに関する詳細はガス補足資料に示されている。](#)

2005 年版ロードマップではプロセスガスや液体の統計的プロセス制御がますます必要となることを確認した。いくつかの会社が材料の変動に対する統計的制御に関する仕様を持った材料を要求し始めた。しかし、業界を横断して受け入れられた SPC 工程を規定する標準は無い。現在、最終ユーザーと供給メーカーの団体の代表者で構成された SEMI 後援の特別委員会があり、ガスや液体の“制御下にある”仕様を定義するための共通の指標を作成している。

“制御下にある”プロセス流体を供給するという保証があると、製造工程全般にわたる変動を最小限にすることにより、あるいは名目上標準的な仕様を満たしている材料品質の大幅な変動に起因するプロセスの破綻の可能性を単純に削減することにより、歩留り向上が期待できる。

多くの半導体製造の大企業が一般ガスや特殊ガスの購入のための統計的プロセス制御(SPC)の要求を実現させているという非公式の調査結果は、既に SPC が生産に使われる材料の多くに利用されているか、近い将来に利用されることになる、ということを示している。しかし、“制御下”の根底をなす基準は実質的には変化する。調査回答は、顧客の期待は POS での材料の準備のためのプロセス制御の利用が、彼らの半導体製造工程の安定性を改善し、高歩留り生産にとって重要であるということを示唆している。最初の実施は、半導体プロセスの変動を引き起こす可能性が非常に大きい、メモリやマイクロプロセッサの新製品や既存製品に使用される、無水塩化水素酸などの特殊材料ガスに焦点が当てられるだろう。

**薬液** — 表 YE3 に、プロセス装置に供給される薬液に対する純度要求値を要約されている。拡散前洗浄の要求値が最も挑戦的な不純物レベルとなっている。液中パーティクルレベルの目標は各技術世代でより純度が高くなることが示されている。これらの目標値は、液中とウェーハ上のパーティクル濃度が直線関係にあると仮定して FEP 表面処理グループが計算した、ウェーハ上の純度要求値から導かれている。現在、薬液中では、パーティクルカウンターの検出感度は 65nm に過ぎない。パーティクルサイズ分布を仮定することにより、より小さいパーティクルサイズまでパーティクル濃度を推測することができる。しかし、これは使用されるフィルタリングのレベルで影響を受ける。様々の薬品に対するもう一つの測定上の課題は、現在のところ不可能であるパーティクルと泡の区別である。

薬液中の有機物やアニオン、カチオン汚染を正確に分析する能力が、ウェーハプロセスを成功させるために重要になってきている。補足資料には[イオン一覧表](#)と[混合の計算](#)が示されており、どの薬品にどのイオンが重要であり、どの薬品の中でそれらが実質的に検出される可能性があるのかを示してある。CMP やめっき用薬液の使用量が増加するとともに、供給される薬液に対する純度要求値の理解を深める必要がある。表 YE3 には少数の CVD/ALD プリカーサーに関する情報しか載せていない。層の種類とそれぞれに対する汚染物質は莫大である。従って、[プリカーサーの表](#)をオンライン用補足資料として掲載した。プリカーサーの表は、どのプリカーサーが異なる技術世代で可能性のある候補となるのか、そして予期される汚染の性質に関する情報を提供している。主たる課題は、一世代二世代しか使われない新規プリカーサーを導入する重要工程に対する歩留り習熟を加速させるための開発である。

**一般ガス/特殊ガス** — 一般ガスの純度に対する要求値に関しては数箇所の変更しかない。リソグラフィ工程で使用される窒素やヘリウム中の有機系難揮発性化合物の 0.1ppb 以下の計測における検出能力が

課題となっている。ロードマップでは、現状の分析手法の検出下限によって、この領域は 2007 年から 2010 年までオレンジ色で示されている。

加えて、不純物としてアルゴンをよりよく制御する必要性を記述する変更が行われている。窒素の仕様では、重大な不純物からアルゴンを削除する変更がされたが、酸素の仕様にはアルゴンが残されている。それでも、2005 年版での 50ppbv というアルゴンの限界値は、1000ppbv まで緩和された。現状の酸素の要求値は、プラズマエッチングプロセスに影響を及ぼす可能性のある制御されていないアルゴン不純物によって決められるが、エッチングに使用される酸素に対するアルゴンの標準的な仕様は、1000ppbv 以下のレベルという点で一致している。

最先端のリソグラフィーのようなプロセスでは、極微量の”高分子量/高沸点”の炭化水素(例えば $C_6-C_{30}$ )は、曝された表面にどんどん吸着し、レンズやマスク、鏡などの上に不揮発性の残渣を残すという光化学的劣化を起こすので有害である。しかし、たとえリテンションタイムが $C_6$ 以下の有機物であっても、それらが難揮発性堆積物になるのであれば有害と考えられる。同じ理由で、シロキサンや有機リン酸エステルも、非常に少量でも有害になる可能性を持っている。それらを最高感度で検出するためには、当該種を直接検出すること、そして適切な標準試料を使って分析器を校正することが必要である。使用される方法は、AMCのための方法と類似しており、TD-GCMSやTD-GC/FID、IMSなどである。これらの手法を使っても、カラム中に残留したり、非常に広いピークとして現れてくる傾向のある、高分子量の炭化水素や極性を持った分子を正確に検出できない場合がある。吸着トラップを使用する方法では、トラップ効率を確定することが重要である。個別の炭化水素をリアルタイムで測定するためにAPIMSを使うことは原理的には可能であるが、大きな炭化水素はイオン化過程で衝突により解離してしまうため校正が困難である。

賛同を得られる妥協案は、TD-GS/MS を使い炭素数 6 以上の全てのピークを足し合わせることである。測定器は通常多成分の標準試料で校正され、ヘキサデカン換算で報告される。この方法で与えられる定量性は概算であり、何種類かの分子は見落とされるかもしれないが、簡便な校正を提供しつつ、少なくとも高分子炭化水素により重点をおくことができる。

酸素と水素は一般的に窒素濃度に関しては他の汚染よりも高いレベルを許容でき、表にはこの結果が反映されている。高純度な CDA やリソグラフィーのパージガス、超臨界  $CO_2$  供給に対する要求値も含まれている。高純度な CDA は必ずしも都合良く安価に手に入る訳ではないが、その製造には技術的な障壁は無い。分析方法は通常クリーンルーム大気中の AMC の分析と同様であり、金属や硫酸塩、アミンなどについては超純水中にバブリングする方法、また、有機物に関しては吸着トラップを使う方法である。おのおの場合で、試料が分析装置(水溶液サンプルは ICP-MS またはイオンクロマトグラフィー、有機物の脱離は GC-MS)に導入される時に必要な感度を得られるように、サンプラーは不純物を濃縮する。この方法は本来時間を要するものであり、もし可能であるならば直接分析する方法が望ましい。しかし、リアルタイム分析に対する明らかに差し迫った必要性は今のところ無い。SO<sub>2</sub> 分析には UV 蛍光分析などの便利なオンライン手法がある。

特殊ガスに関して表 YE3 では、エッチャントやドーパント、デポジション用ガス中の汚染の値が拡張されてきた。それは、使用される材料の数が増加することを反映させ、それらが使用されるプロセスについてきちんと記述するためである。パーティクル濃度の値は、通常オンラインのモニターが行われていないことやPOUのパーティクルフィルタの有効性が十分に確認されているため、表から除かれている。低温のエピ成長やそのためのクリーニングガスというような非常に要求の高い用途では、デポジション温度が低温化すると共に純度の改善により利益を得つつけられるという証拠はあるが、そのレベルを実質的に改善するよりもむしろ、現実的に最良な純度のものを幅広く使っていくということも考えるべきである。

一般ガスと特殊ガス両方に対して、純度の絶対値を改善するよりも、純度の変動をより厳しく制御することの方が重要になると予想される。しかし、化学的に活性な特殊ガスが増えると、POSの純度をPOPへの

供給系統全域にわたって維持するという非常に厄介な課題が持ち上がる。塩化水素のような選択的特殊ガスは POS における統計的プロセス制御(SPC)のための最初の対象の一つとなるだろう。

**新規材料** — プロセスで使用される新規材料の数はますます増加しており、その不純物に関する詳細な考察は非常に重要になってくるだろう。新規金属酸化膜、CMP スラリー、低/高誘電体材料、CVD や電解メッキ溶液などでのプリカーサー材料、Cu、Ta といったバリア膜や導電膜というような重要な材料に対する要求不純物レベルは幅広く研究されてない。そしてこれらの材料の多くは表 YE7 には掲載されていない。半導体プロセスで使用される薄膜用プリカーサーの特性を列挙し明らかにしようとした初期の試みは、この章の補足資料に示されている。(リンク先を提示)

薄膜成膜用プリカーサーは水分や空気、高温に非常に敏感である。POS からチャンバー(反応器)までの供給プロセスにわたる制御は高歩留まり達成にとって重要である。これらのシステムにおいて、分解反応による有害な分子やパーティクル状不純物の発生を抑制するために、非常に高純度な輸送ガスやパージガスの使用がしばしば要求される。伝統的に純化器は、一般ガスの供給システムにおいて、供給ガスに含まれるパーティクルや、酸素、水分のような均質の化学的汚染を除去するために使用されてきた。しかし、POU における純化器が開発され市販されると、特に非常に決定的に重要な汚染制御レベルが必要なプロセスステップに要求される特殊ガスのための POU 純化器を利用したいというユーザーが出てくる。これらの POU 純化器は化学汚染を非常に高効率で極低レベル(~ppt)まで除去することができ、低所有コストで使いやすく、交換も簡単である。これらの POU 純化器はプロセスチャンバー入り口の極近傍に設置できるので、化学的に純化、ろ過したプロセスガスに対して最小限の輸送経路と最小限の汚染を保証する。

これらの材料が、技術の要求を満たす不純物規格で製造されていることを保証するために、新たな測定技術や与える影響の研究が必要である。現在考えられている薄膜新規物質(プリカーサー)の種類の詳細は表 YE3 の薬液の項目と[プリカーサー補足一覧表](#)に記載されている。

Table YE3 Technology Requirements for Wafer Environmental Contamination Control

## 検査、分析、特徴付け

2011 年版として以前より拡張された検査、分析、特徴付けの節を定義する。以前の該当節は、検査の能力に限定されていた。現在の歩留り向上の要求は幅広い応用に直面している。例えば”More than Moore”に対応した技術のみならず、パワーエレクトロニクスやメカトロニクス、MEMS への応用などである。さらに検査、分析、特徴付けは、アセンブリ&パッケージングなども考慮に入れる必要がある。この適用範囲の大きな変更は 2010/2011 年に決定された。Table と解決策候補は 2013 年版に記載される予定である。

歩留りに影響を与える特定のプロセスで発生する欠陥を、インラインで検出できる能力を得ることが、欠陥検査に対する第一の要求である。プロセスの研究開発段階、歩留り立上げの段階、そして量産の様々なフェーズに対応して処理能力を向上させていくことは、欠陥検出技術の適用範囲を拡大することを意味し、また検査感度向上と処理能力向上の両立という極めて複雑な課題に対する解を得ることを意味する。以上のような要求はますます重要になっているが、その背景として、欠陥検査装置への多額の投資に見合う最大の効果を得るために、同じ欠陥検査装置を用いて様々なプロセス成熟度にある複数の製品を量産するようになってきていることがある。

プロセスの開発から量産の各フェーズに対応した性能を持つ装置が、統合デバイスメーカ(IDM)に対して適切な時期に供給されなければならない。とりわけプロセスの研究開発に必要な装置は新しい世代のデバイス技術が導入されるのに先行して必要とされている。また歩留り立上げのフェーズで必要な装置は量産が始まる数ヶ月前に準備できていなければならない。最終的に、その技術世代の製造プロセスの異常をモニタリングできる能力が、高い製品歩留りに達する段階で必要となる。

技術課題は、3つの表がカバーしているニーズに示されている：a) パターン付ウェーハ検査と電子ビーム検査、b) ノンパターンウェーハ検査、マクロ検査、エッジ検査、エッジ部欠陥レビュー；そしてc) 欠陥レビュー及びADC（自動欠陥分類）。プロセスが複雑な複合デバイスを計画的に生産するために、プロセス及び装置をモニタリングできる強力な欠陥検査が必要とされる。ノンパターンウェーハ欠陥検査は、装置の性能/能力の確認用途として幅広く用いられている。これら両方の欠陥検査の後に、原因調査解析のために続けてレビューを行うが、そちらに対しては欠陥座標精度がチャレンジ要求項目として挙げられている。その上さらに、検査装置自身の清浄度も重要度が高まっている。歩留りに注目してウェーハベベルやエッジの観察をし始めた影響で、ウェーハ裏面やベベルの検査においても、ウェーハ全領域で適用できる欠陥レビューが必要になった。高段差(HARI)欠陥検査、定義としてはパターンの幅と深さの比で定義されるアスペクト比が3以上の構造物内の欠陥検査は、微小欠陥を検出する事ができ またこの様な用途に適しているとされる電子ビーム式検査装置で検査が行われる。

主要な挑戦のひとつとして、検出したい欠陥（問題とされる欠陥）を検出する事が挙げられる。そのため、SN比はすべての欠陥検査装置にとって、重要な基準となる。多量の意味の無い欠陥を検出すれば、どんなに適切なレビューをおこなっても検出したい欠陥がなかなか見つからなくなってきてしまい、欠陥検査結果の価値が下がってしまう。その上で、ノイズの中から重要な注目すべき欠陥(DOI)を効率よく分離する技術は、次に行われるレビューのスループットの向上を可能とする。

ノンパターンウェーハ検査における要求技術項目は、基板と膜の種類に依存している。また、ウェーハ裏面の欠陥検出の際にはウェーハ表面に何らコンタミネーションや物理的な接触をもたらさないことが望まれる。このウェーハ裏面に関する要求項目は、リソグラフィ章の技術要求の Table にある。また同様に、今回導入された、検査装置それ自身の装置清浄度の仕様にも問われている。

他にも幾つかの欠陥モードが検査装置で検出することが必要となっている。見えない欠陥（従来の光学的手法で検出できない欠陥）に対する知見の獲得についても、電子ビーム技術を用いた検出技術の適用拡大と合わせて必要性が高まってきている。上述の大半の欠陥は表面下の位置に存在し、デバイスの縦構造に対し無視できない大きさを持つ傾向がある。今の所これらの欠陥の検出すべき最小寸法の定義は明確になっていない。多くの欠陥はデバイス性能に電気的な影響を強く及ぼし、それはフロントエンドプロセス（コンタクト酸化膜形成プロセス以前のプロセス）にもバックエンドでのプロセスにも同様に影響を及ぼす。また、以下で規定されるようなサブミクロンの欠陥検出を急ぐあまり、ウェーハの広い領域に影響を及ぼすマクロ欠陥が見落とされることがあってはならない。マクロ検査のスキャンスピードは、すべての技術世代において、（検査時間を含んだ）リソグラフィの処理能力や、時には CMP の処理能力に合致するよう、継続して向上されなければならない。

一方、半導体デバイスメーカーは急速な歩留り立上げと歩留り損失のリスクを避けるために十分な頻度の自動検査を行うが、それにかかるコストと得られる利益とのバランスを取ることが重要である。欠陥検査装置の投資コストと占有面積、そして処理能力が CoO (Cost of Ownership) に響く主要な要素である。現在、CoO の高さのため多くの半導体デバイスメーカーが、僅かなサンプリング用途として検査装置を配置するにとどまる状況となる。歩留りの習熟曲線を最大限高めるために、統計的に最適化したサンプリングアルゴリズムが必要である。将来的に受け入れられる CoO を保つためには、適用性のある検査レシピを使用できる事や感度とスループットの向上が必須となる。もし将来、検査感度は向上するものの処理能力が低下したとすると、その装置の CoO は上昇し、半導体デバイスメーカーはさらに僅かなサンプリングしかできず、結果として歩留り損失のリスクが高まり、また歩留り向上の速度が低下する。

Table YE4 と YE5 そして YE6 に示す検査感度要求値は、テストウェーハあるいは校正用ウェーハ上に塗布したポリスチレンラテックス(PSL)球に対する検出感度で規定する。しかし、新規の装置はプロセス開発の間に発生する実欠陥に対する検出能力で評価されることが多い。このような欠陥は高解像度の顕微鏡光学系を使って検出する。これらの欠陥にはパーティクル、ピット状のパターン傷、表面荒れ、スクラッチが含まれている。また、様々な工程において様々な欠陥タイプが増えてきており、客観的に新旧の欠陥検査装置を評価するため、標準欠陥ウェーハを開発することが急務となっている。

Table YE4 Defect Inspection on Pattern Wafer Technology Requirements

Table YE5 Defect Inspection on Unpatterned Wafers: Macro, and Bevel Inspection Technology Requirements

Table YE6 Defect Review and Automated Defect Classification Technology Requirements

## 解決策候補

### ウェーハ環境制御

**プロセス装置** — プロセス装置内での欠陥を削減することは、欠陥密度の目標を達成するための最重要課題である。解決策と技術開発が今後 15 年間の主要な性能強化の可能性を提供し、90nm 以下のデバイスの低コスト大量生産の持続を可能にすると期待されている。図 YE2 と YE3 によれば、装置起因欠陥の目標は主として水平方向のスケーリングに基づいている。垂直方向の欠陥は、ゲートスタック構造や金属および見えない汚染、そしてパラメトリックな感度に適用される際に理解が必要となる。新しい洗浄剤やその場 (*in situ*) チャンバーモニタリング法、材料の開発、そして部品洗浄の改善を含む技術により、処理毎のチャンバー清浄度の維持やチャンバーのウェット洗浄頻度の大幅削減が可能になる。これらの開発は装置稼働率向上に寄与するだろう。ウェーハ裏面汚染の削減要求が計測技術と装置の根本的な変化をもたらす。ウェーハ裏面から次のウェーハ表面への金属やパーティクルのクロスコンタミネーション、リソグラフィ工程におけるホットスポットや焦点深度そして静電チャックの突き抜けが、将来の装置に於いて対処を要する全ての問題となる。Oリング材料の選定、ガスの流れや温度管理、ウェーハチャックの最適化などのパーティクルを回避するための技術が、欠陥密度の目標を達成するための大きな役割をになう。チャンバーでの汚染形成、搬送、堆積物の基本的な理解を深めることが、現在の装置やプロセス設計を強化するのに必要であり、その場 (*in situ*) センサーからのデータ解釈に役立てるために必要となる。これら基本的な物理、化学そしてプラズマチャンバーの汚染モデルを採用すべきである。プロセス起因の欠陥を削減し、必要な検査を最小限にするために、その場 (*in situ*) プロセス制御がますます重要となってくる装置における知的プロセス制御のためには、パラメーターがデバイス性能にどのように影響するかという基本的な理解が必要である。知的プロセス制御のためには、使用者と装置供給者両者が、新しいセンサーと新しいソフトウェアを簡単に一体化できるような公開の装置制御システムが必要である。

**プロセスの重要な材料** — 図 YE3 に欠陥を防止し排除するための解決策が示されている。増大する純度への必要性を確認するためには、デバイスへの影響に対するさらなる研究が必要である。腐食の可能性のようなシステムの懸念のために、より高純度を追求するというプロセスの懸念を引き出すかもしれない。

新たな材料を内蔵するプロセスの歩留向上を加速するためには、研究開発には実用的な純度データを含めることが望ましい。ゲート絶縁膜のような新材料の研究は、初め基本的なプロセス性能に関心をもたれるが、その後は集積の問題となる。そのような開発段階では、汚染に対する関心は比較的小さい。しかし、情報を集めなければ、その後の歩留向上の努力は不適切な技術基盤を基に進められることになる。収集や報告する環境や材料の汚染のデータが実用的であれば、長期的に見て大きな価値をもつ。

**超純水** — 仕様を満足する超純水システムであれば、現在のデバイス構造に対する大きな欠陥要因とはならない。このことに基づいて、ロードマップでは将来の構造に対しても大きな変更は必要ないと予測している。ロードマップの優先順位としては、重要な変更を促すためには、超純水に関係する具体的な欠陥発生メカニズムが必要となる。現在の焦点は、装置が水質、特にパーティクル、バクテリア、溶存ガスに与える影響を理解すること、そして純水中に存在すると考えられるが利用できる分析手法の検出下限以下の物質を特定することである。超純水中の低レベルの汚染を特定する有機物や有機イオンの測定方法の改善が必要である。再利用や再生の取組みが、短時間のオンライン分析技術、特に POU での再利用超純水が、再生しない超純水と同等かまたは高純度であることを確認するための有機物の検出技術の改良をもたらすだろう。

**化学薬品** — 図 YE3 に、ウェーハ製造プロセスに輸送される薬品の純度を高めたり測定するための様々な技術分野を示す。

**ウェーハ環境制御** — 制御すべき雰囲気汚染のリストが増えるとともに、測定能力も増強しなくてはならない。手頃な価格で正確、再現性がありリアルタイムで検出できるパーティクル汚染の無いセンサーがますます必要になってくる。プロセスの敏感性が増すとともに、ウェーハを搬送したり保管したりするための不活性雰囲気の使用が増えてくると考えられる。ゲート酸化前やコンタクト形成前の洗浄、サリサイデーションがこの性能を初めに必要とするプロセスとして挙げられる。それに加えて、不活性雰囲気を使うことにより真空ロードロック装置への水分の持込を低減でき、汚染やロードロックの真空引き時間を削減できる。密閉のパージシステムが既にありまた発展している一方、洗浄装置のように不活性雰囲気が必要とされる装置には困難な課題がある。ウェーハ隔離技術が発展するにつれ、キャリアや容器の設計や材料選定が、ウェーハを環境から隔離する上で、また、汚染そのものを出さないという点で非常に重要になる。加えて、材料や設計がプロセス間のクロスコンタミネーションを促進してはならない。密封技術や低アウトガスで吸着のない材料の開発が、効果的なウェーハやレチクルの隔離配置にとって鍵となる。

|                                                                                                                                        | First Year of IC Production<br>(e.g. DRAM 1/2 Pitch)                                | SUBSTRATE         |                     | SUBSTRATE LOCATION  |                     |                       | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016   | 2017 | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   | 2022   | 2023 | 2024  | 2025 | 2026 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|------|------|
|                                                                                                                                        |                                                                                     | Apply to<br>WAFER | Apply to<br>RETICLE | Apply to<br>STORAGE | Apply to<br>PROCESS | Apply to<br>TRANSPORT | 40nm | 36nm | 32nm | 28nm | 25nm | 22.5nm | 20nm | 17.9nm | 15.9nm | 14.2nm | 12.6nm | 11.3nm | 10nm | 8.9nm |      |      |
| <b>New FOUP<br/>outgassing /<br/>contamination</b>                                                                                     | Off line AMC measurement in laboratory                                              | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Online AMC measurement inside FOUP<br>in fab                                        | Yes               | No                  | Yes                 | Yes                 | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
| <b>Used FOUP<br/>outgassing /<br/>contamination<br/>(no wafer<br/>inside)</b>                                                          | Off line AMC measurement in laboratory                                              | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Online AMC measurement inside FOUP<br>in fab                                        | Yes               | No                  | Yes                 | Yes                 | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Vacuum purge and heating                                                            | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
| <b>Cross<br/>contamination<br/>on wafer inside<br/>FOUP (e.g.<br/>acids after dry<br/>etch, oxygen or<br/>humidity<br/>before epi)</b> | Online AMC measurement inside FOUP<br>in fab                                        | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Integrated AMC measurement inside<br>load port                                      | Yes               | No                  | No                  | Yes                 | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Vacuum purge : outgass the FOUP with<br>wafers under vacuum and fill it with N2     | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | N2 purge station : injection of N2 inside<br>FOUP with wafer                        | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | N2 purge station integrated in stocker :<br>injection of N2 inside FOUP with wafers | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | FOUP change : transfer the wafers in a<br>clean FOUP during q-time                  | Yes               | No                  | Yes                 | No                  | Yes                   |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Purgeable load port : injection of N2<br>when the FOUP is connected to the<br>EFEM  | Yes               | No                  | No                  | Yes                 | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |
|                                                                                                                                        | Outgassing chamber integrated in<br>process equipment                               | Yes               | No                  | No                  | Yes                 | No                    |      |      |      |      |      |        |      |        |        |        |        |        |      |       |      |      |

This legend indicates the time during which research, development, and qualification/pre-production should be taking place for the solution.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Research Required              |  |
| Development Underway           |  |
| Qualification / Pre-Production |  |
| Continuous Improvement         |  |

Figure YE2 Potential Solutions: Wafer FOUP contamination measurement and control

| First Year of IC Production<br>(e.g. DRAM 1/2 Pitch)                                                          | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| GENERAL                                                                                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Fluid purity impact on device yield / performance                                                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Contaminant based process control                                                                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>AIR/AMC</b>                                                                                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| On-line monitor for AMC contaminants - Refractory Compounds                                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| On-line monitor for AMC contaminants - Bases - Improvements of<br>amine detection                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| On-line monitor for AMC contaminants - Acids - Beyond corrosion<br>monitoring                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| On-line monitor for AMC contaminants - Condensables - high molecular<br>weight compounds                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| On-line monitor for AMC contaminants - all classes - restricted volumes -<br>FOUP, FOSB, Pods                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Development of emergency response procedures and measures for<br>fugitive emissions                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Verification for AMC limits relative to process excursions or yield events                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Reduced cost of ownership for AMC control                                                                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Ultra Pure Water</b>                                                                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Particle metrology needed to keep pace with critical dimension in the<br>roadmap                              |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Particle filtration performance validation                                                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Correlation of specific organic functional groupings to wafer defects via<br>Failure Mode and Effect Analysis |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Figure YE3 Potential Solutions for Wafer Environmental Contamination Control

| First Year of IC Production<br>(e.g. DRAM 1/2 Pitch)                                                                 | 2011<br>40nm | 2012<br>36nm | 2013<br>32nm | 2014<br>28nm | 2015<br>25nm | 2016<br>22.5nm | 2017<br>20nm | 2018<br>17.9nm | 2019<br>15.9nm | 2020<br>14.2nm | 2021<br>12.6nm | 2022<br>11.3nm | 2023<br>10nm | 2024<br>8.9nm | 2025 | 2026 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|---------------|------|------|
| <b>CHEMICALS</b>                                                                                                     |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Development of sub 65 nm particle counter                                                                            |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Filtration 0.02/0.04 µm with high flux (1 gpm/0.5 psi/10"/1cP)                                                       |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Filtration sub 0.02 µm with higher flux                                                                              |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Reduced pressure fluctuations by improved BCD system performance and by better pressure and flow control             |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Improved blend accuracy taking into account incoming chemical concentration changes (closed loop control capability) |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Improved metrology for concentration measurements                                                                    |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Improved flow capacity for piping components                                                                         |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Improved connection technology (reduce leakages)                                                                     |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Higher purity resins (metals, organics, anions, cations, surface smoothness, permeability)                           |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Particle characterization to identify source of contamination                                                        |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Anion & cation measurement in process chemicals, e.g. cleaning chemicals                                             |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Organic measurement (TOC and speciation) in process chemicals, e.g. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , IPA              |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Contaminant characterization in CMP slurries, e.g. zeta potential, large particle size                               |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| On-line contaminant and constituent measurement in plating chemicals, e.g. copper sulfate, organic additives         |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| <b>PRECURSORS</b>                                                                                                    |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Particle measurement for precursors                                                                                  |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Other analyzer techniques for precursors (precursor specific contaminants, see supplementary table)                  |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| <b>GASES</b>                                                                                                         |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Development of statistically process controlled (SPC) based specifications for critical specialty gases              |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Bulk gas purity requirements, specifically of carrier and purge gases for moisture sensitive materials               |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |
| Blending accuracy for low concentrations of dopant mixtures                                                          |              |              |              |              |              |                |              |                |                |                |                |                |              |               |      |      |

This legend indicates the time during which research, development, and qualification/pre-production should be taking place for the solution.

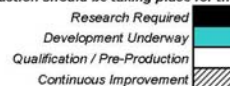


Figure YE3 Potential Solutions for Wafer Environmental Contamination Control (continued)

## 検査、分析、特徴付け

パターン付きウェーハ検査への要求事項は、今後しばらくは擬似信号 (nuisance signal) の内から欠陥を検出する問題を克服することである。これは、高スループット下で最感度を得る問題と関係が深い。歩留立ち上げと量産の為にロードマップが要求する感度で必要とされる処理能力を達成する為には、大きな技術のブレークスルーが必須である。高アスペクト比の検査は、検査ツールの COO が高いために、高スループット下で高い検査精度を得る事が求められている。この為には、ノイズから欠陥信号を上手く分離する事が必要になる。高エネルギー源を使用した次世代リソグラフィ・プロセスの導入は、ウェーハ表面に化学反応や層の改質を起こす可能性がある。したがって、揮発性および不揮発性有機物の検出が重要である。

| First Year of IC Production                                                 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Pattern Wafer Inspection</b>                                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| High sensitivity at high throughput                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| High signal to noise ratio                                                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>High Aspect Ratio Inspection</b>                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| High sensitivity at high throughput                                         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| High signal to noise ratio                                                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Detection of volatile and non-volatile organic surface contamination</b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| laboratory scale quantification and qualification                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| development of in line method                                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| in line monitoring                                                          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

This legend indicates the time during which research, development, and qualification/pre-production should be taking place for the solution.

Research Required

Development Underway

Qualification / Pre-Production

Continuous Improvement



Figure YE4 Potential Solutions for Characterization, Inspection and Analysis