

WG11 活動報告

(Yield Enhancement)

デバイス・プロセスの多様化における
汚染・欠陥計測の新たな要求

嵯峨幸一郎(ソニー)

報告内容

(0) 歩留りに影響する欠陥と活動のポイント

(1) ウェハ環境汚染管理

(Wafer Environment Contamination Control)

- 純水や薬液の管理ポイントおよび管理値の変更に向けた取り組み

(2) 欠陥検査・分類・分析

(Contamination, Inspection and Analysis)

- 歩留り向上につながる検査技術の方向性
- 三次元積層プロセスにおける欠陥検査技術の最新動向

メンバー

氏名	会社名	YE 役割分担案
嵯峨幸一郎	ソニー	リーダー・YE国際
富田 寛	東芝	サブリーダー・委員
玉置真希子	東芝	委員 WECC
藺部悠介	ローム	委員 WECC, CIA
槌谷孝裕	富士通セミコンダクタ	委員 CIA
水野文夫	明星大学	特委_アカデミア・CIA WECC
達本剛隆	レーザーテック	特委_計測装置サプライヤ CIA
池野昌彦	日立ハイテク	特委_計測装置サプライヤ CIA
近藤 郁	リオン	特委_計測装置サプライヤ WECC
森良弘	堀場製作所	特委_計測装置サプライヤ WECC
斎藤美佐子	東京エレクトロン	特委_製造装置サプライヤ・WECC・
北見勝信	栗田工業	特委_材料サプライヤ・WECC
二ツ木高志	オルガノ	特委_材料サプライヤ・WECC・幹事
杉山 勇	野村マイクロ	特委_材料サプライヤ・WECC・

WECC; ウェハ環境汚染管理

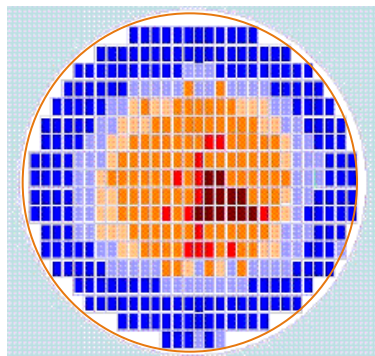
CIA: 欠陥検出技術

歩留 $Y = Y_{\text{systematic}} * Y_{\text{random}}$

* Y_{random}

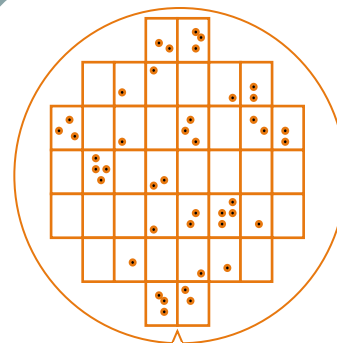
各社の各デバイスに
固有であることが多い

ウェハ面内
不良分布

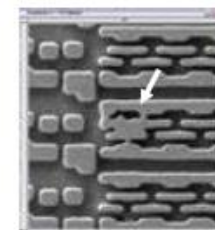


原因の例
 ・膜厚変動
 ・線幅変動
 ・不純物濃度変動

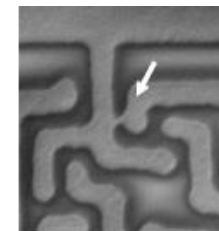
ITRSでは主にランダム欠陥に関して活動



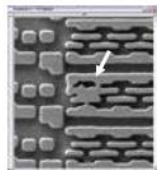
原因の例
 ・パターン欠陥
 ・配線short/open



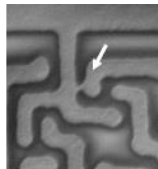
(例) パターン崩れ



(例) 配線Short 欠陥

$$Y_{\text{random}}$$


(例) パターン崩れ



(例) 配線Short 欠陥

$$Y = \exp(-A * D)$$

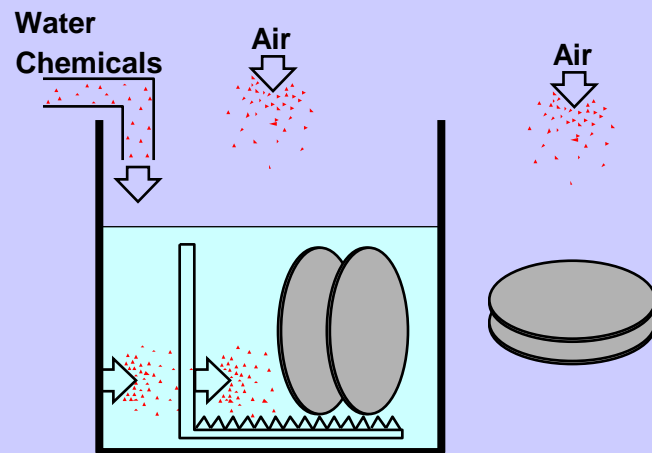
A : area(cm²)
D : defect density (/cm²)

歩留りモデルによる工程許容欠陥算出

近年、各社デバイスの多様化、システム欠陥や見えない欠陥の影響増加により歩留りモデルと工程許容欠陥の議論は停止

WECC (Wafer Environment Contamination Control)

金属汚染、分子状汚染などの見えない欠陥となる汚染の影響が顕在化してきたため、その管理値が議論されるようになった。



純水および薬液中の汚染濃度の要求テーブル

Table YE3 Technology Requirements for Wafer Environmental Control 2014 2015 2016 2017 2018

Year of Production	2014	2015	2016	2017	2018
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f)	20	18	15.9	14.2	12.6
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	28	25	22.5	20.0	17.9
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)	24	21	18.9	16.9	15.0
MPU Printed Gate Length (nm) ††	25	22	19.8	17.7	15.7
MPU Physical Gate Length (nm)	18	17	15.3	14.0	12.8
Wafer Environment Control such as Cleanroom, SMIF POD, FOUP, etc....not necessarily the cleanroom itself but wafer environment.					
Critical particle size (nm) [1]	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3
純水中					
Ultrapure Water [29]					
Resistivity at 25°C (MΩ·cm)	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2
Total oxidizable carbon (ppb) [22]	<1	<1	<1	<1	<1
Non-polar Organics as C (ppb) [41]	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Polar Protic Organics as C (ppb) [42]	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Polar Aprotic Organics as C (ppb) [42] [43]	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Bacteria (CFU/liter) [38]	<1	<1	<1	<1	<1
Total silica (ppb) as SiO ₂ [18]	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Colloidal Silica (ppb) s SiO ₂ (add note)	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
Number of particles >critical particle size (see above) (#/L) [26]	1000	1000	1000	1000	1000
Dissolved oxygen (ppb) (contaminant based) [16] POE	<10	<10	<10	<10	<10
Dissolved nitrogen (ppm) [10]	8-18	8-18	8-18	8-18	8-18
Metals (ppt each) (Co, Cr, Ga, Ge, Mn, Mo, Sr, Ti,) [40]	<10	<10	<10	<10	<10
Critical metals (ppt, each) (Ag, Al, Au, Ba, Ca, Cu, Fe, Hf, K, Li, Mg, Na, Ni, Pt, Zn) [40]	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Other critical ions (ppt each) [24]	<50	<50	<50	<50	<50
Phosphate as HPO ₄ (ppt)	<20	<20	<20	<20	<20
Boron (ppt) [24]	<50	<50	<50	<50	<50
薬液 IPA中					
100% IPA: Na, K, Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Ca (ppt, each) [28]	150	150	150	150	150

パーティクル径

シリカ

パーティクル数

溶存酸素

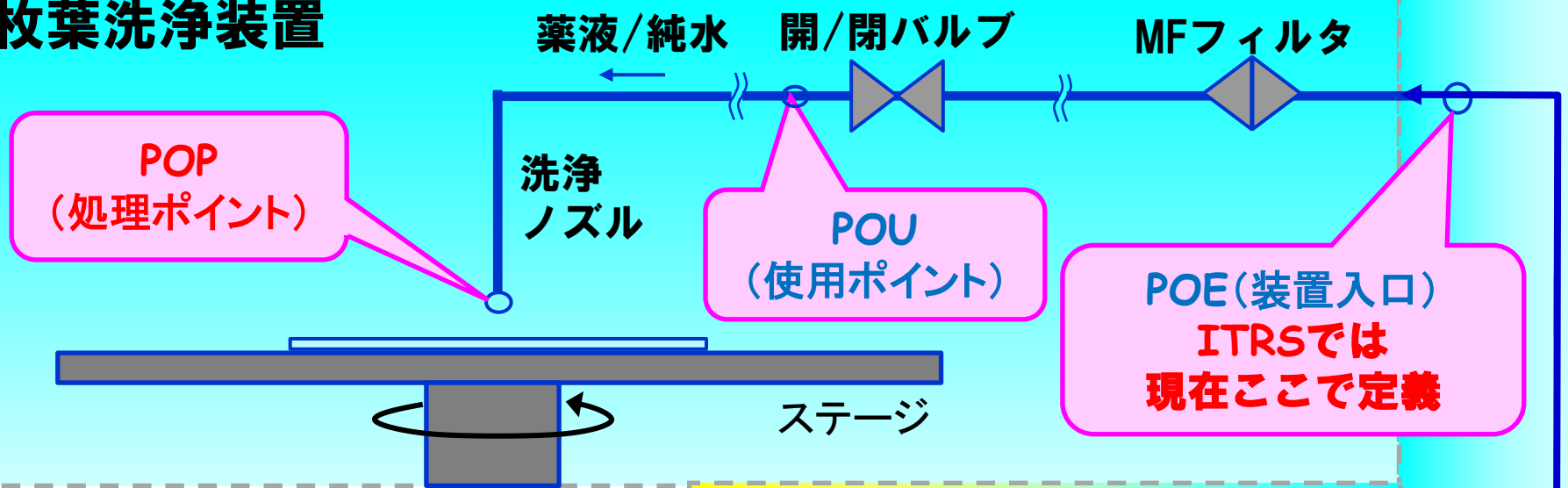
重金属汚染

⇒今のままの定義で減らすべきか？

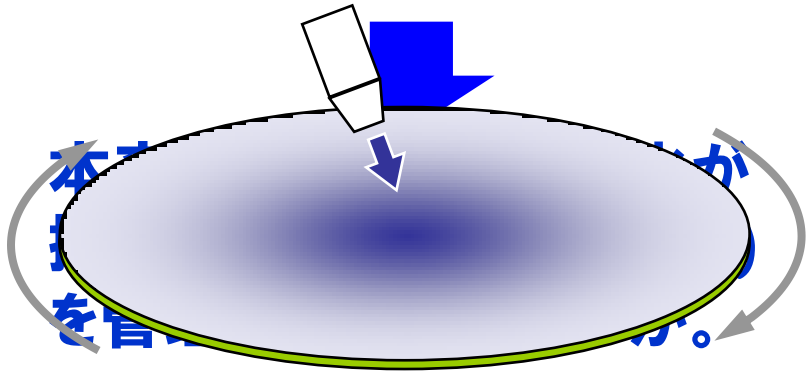
⇒十分か？

超純水中不純物の例

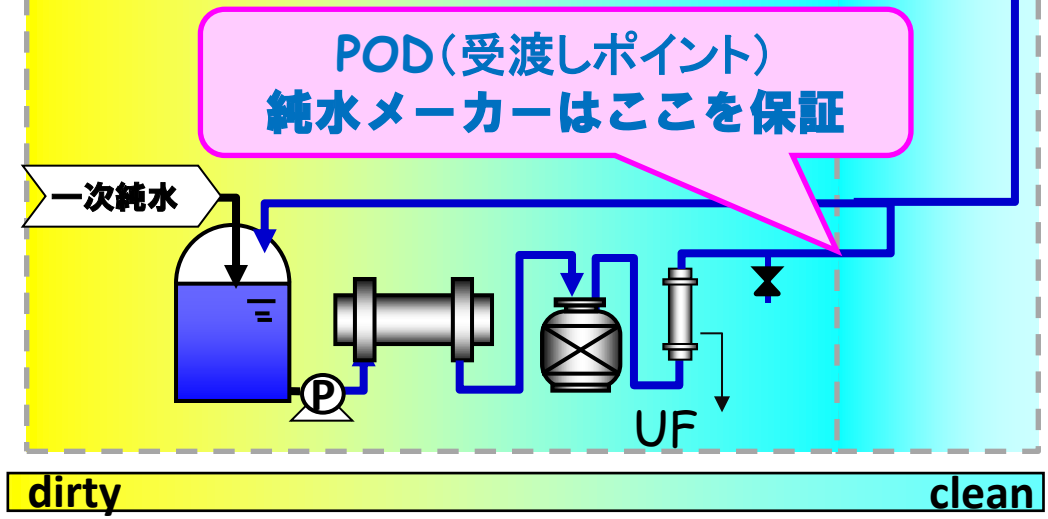
枚葉洗浄装置



ITRSはPOEで定義されており、超純水サプライヤはPODを保証している。



超純水製造システム



POEからPOU, POPへ（純水中不純物）

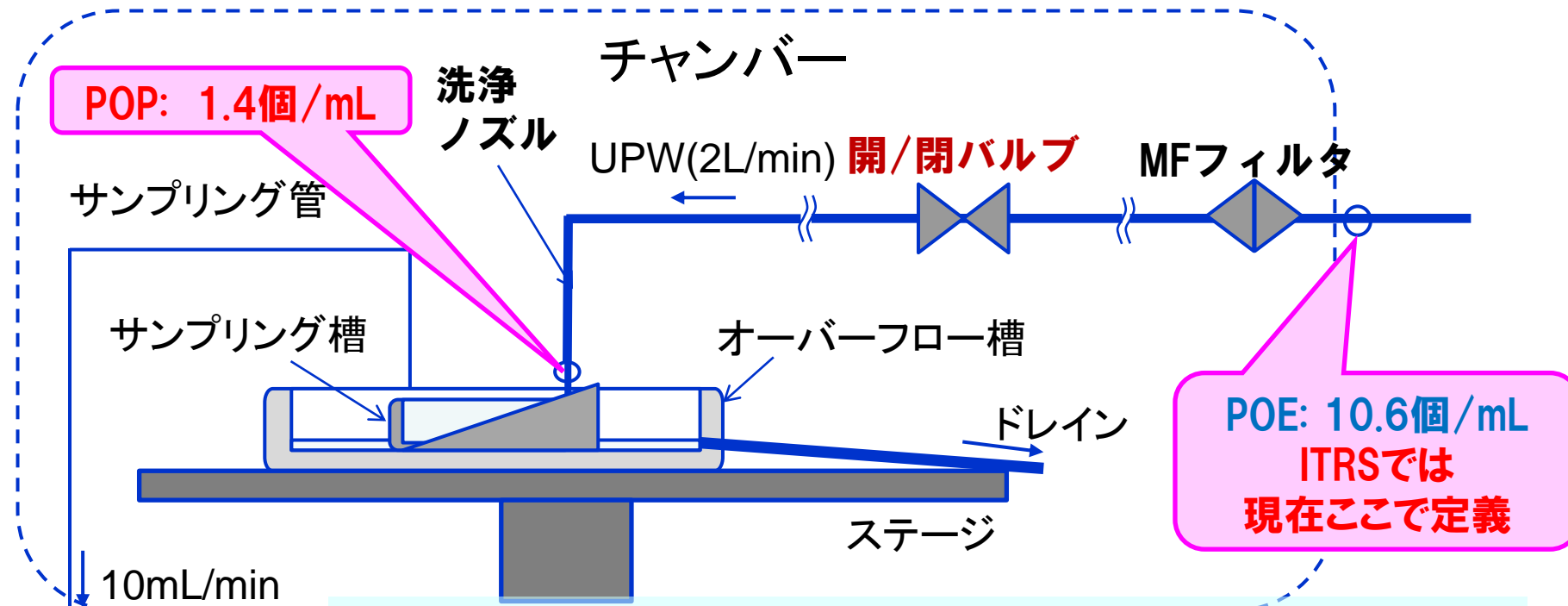
本来はここで定義すべき

	POS 供給ポイント	POD 受渡ポイント	POC 接続ポイント	POE 入口ポイント	POU 使用ポイント	POP プロセスポイント
Interfaces	SEMI Standards Focus Area	ITRS Factory Integration Facilities Group Focus Area		ITRS Factory Integration Equipment Group Focus Area	ITRS FEP, Litho, Interconnect TWG Focus Area	
純水	Raw water	Outlet of final filtration in UPW plant SEMI UPW	Outlet of submain take off valve	Inlet of wet bench or subequipment ITRS	Inlet of wet bench or connection point to piping, which is also used for other chemicals	Wafer in production
薬液	SEMI Chem	Outlet of final filtration of chemical distribution unit	Outlet of VMB valve	Inlet of wet bench or intermediate tank	Inlet of wet bench bath or spray nozzle	Wafer in production
特殊ガス	Gas cylinder or bulk	Outlet of final filtration of gas cabinet	Outlet of VMB valve	Inlet of equipment	Inlet of chamber (outlet of MFC)	Wafer in production
バルクガス	SEMI Gas	Outlet of final filtration/purification	Outlet of submain take off valve or VMB valve	Inlet of equipment/subequipment	Inlet of chamber (outlet of MFC)	Wafer in production
雰囲気	Outside Air	Outlet of make-up air handling unit	Outlet of filters in Cleanroom ceiling	Inlet to mini-environment or sub-equipment for AMC, outlet of the tool filter for particles SEMI AMC	Gas/Air in vicinity to wafer/Substrate ITRS	Wafer/Substrate in production (AMC/SMC)

ITRSにおいて、純水は装置入口で定義されているが、実際はその手前の供給のところの値が多数ある。受渡や入口で低減することが目的ではなく、プロセスポイントで問題になる欠陥や不良となる因子をPOUで低減化することが目的である。

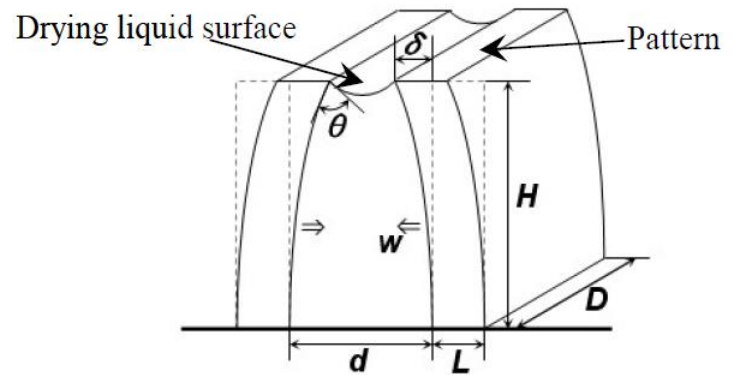
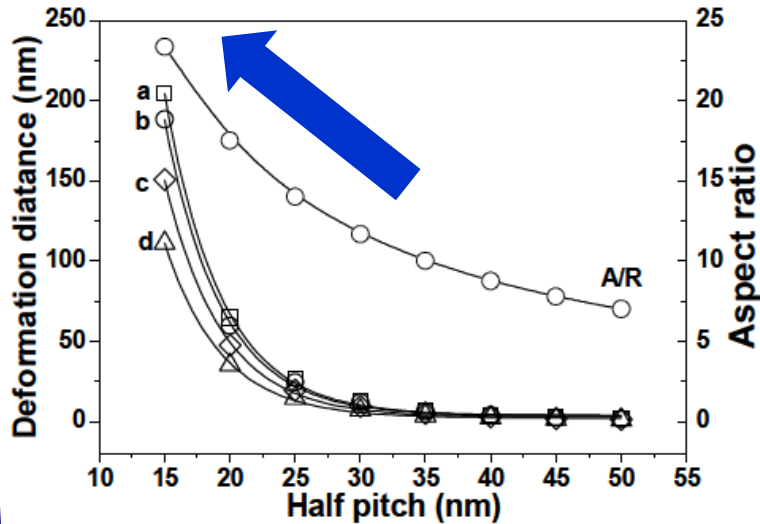
SEMI Japan Liquid Chemical委員会Study Groupの協力のもとに純水のPOPの濃度を実際に測定を試みた。

純水リンス工程における枚葉洗浄装置POPの粒子測定 (>50nm)



パーティクルはフィルターがPOEの後段に設置されていることにより、POE > POPとなるが、そのフィルター後段に設置される開閉バルブ動作にて、パーティクル、及びバブル(泡)を発生させる恐れあり。⇒ **POE低減だけでは不十分**

高アスペクト構造化により乾燥時のパターン倒壊を防止するために、IPA液体置換による乾燥が必要に



$$\delta = 3\gamma \cos\theta H^4 / dEL^3.$$

薬液
洗浄

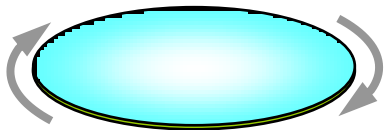
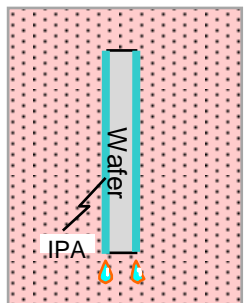
純水
リンス

IPA乾燥

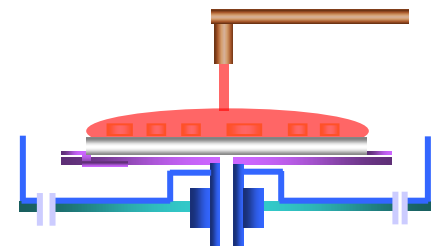
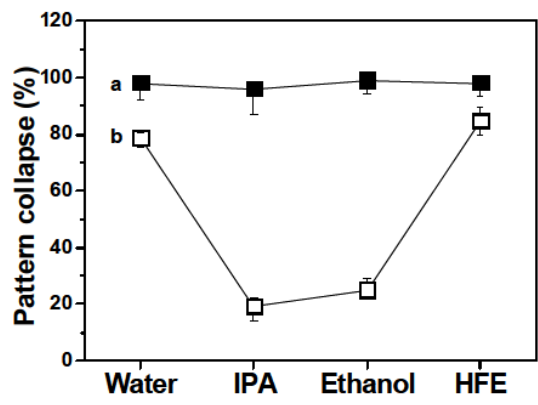
スピン乾燥

IPA 蒸気乾燥

純水スピン乾燥



IPA液体乾燥

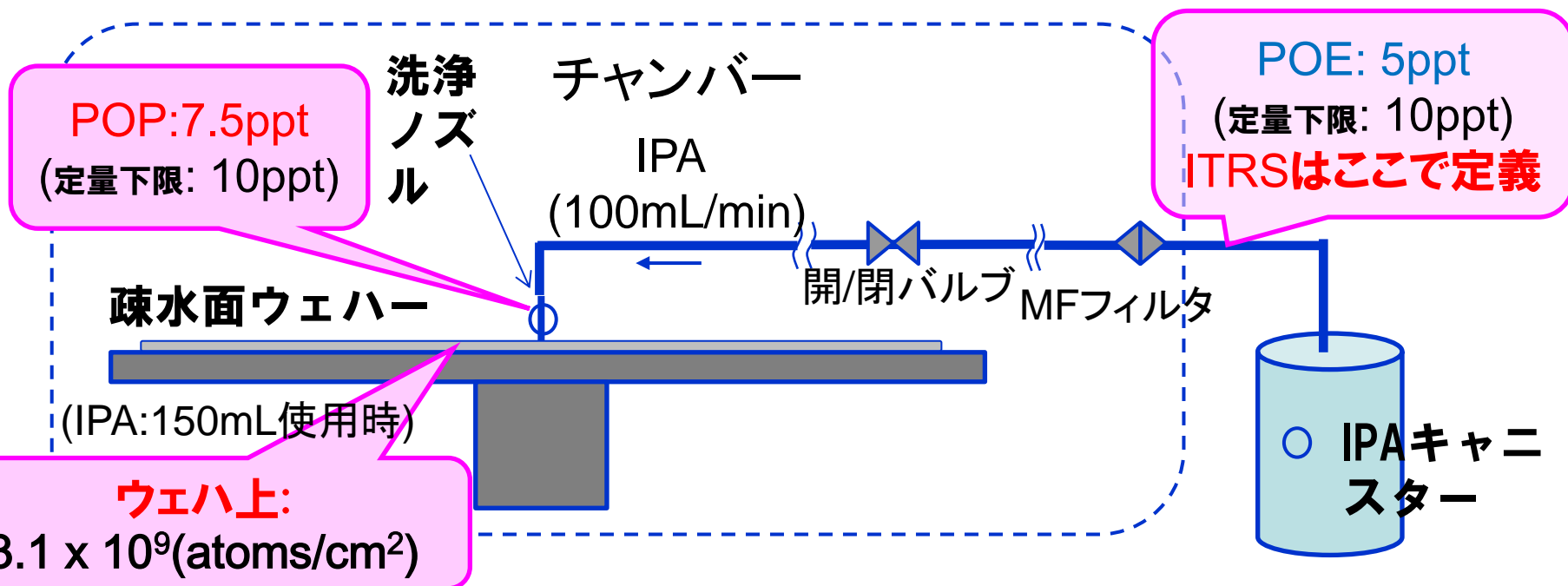


G. Kim, UCPSS 2010

SEMI Japan Liquid Chemical委員会Study Groupの協力のもとにIPAのPOPの濃度を実際に測定を試みた。

STRJ

IPA乾燥工程における枚葉洗浄装置POPのFe汚染測定



Fe濃度は、数ppt (POE ≤ POP) であり、ウェハに約1/10付着するものと考えられる。

⇒ 現在のITRS値 (150ppt) の見直しが必要。

IPA中金属不純物の定量下限は、現状、約10ppt程度と不十分。

⇒ POP濃度を高感度に測定する技術が必要。

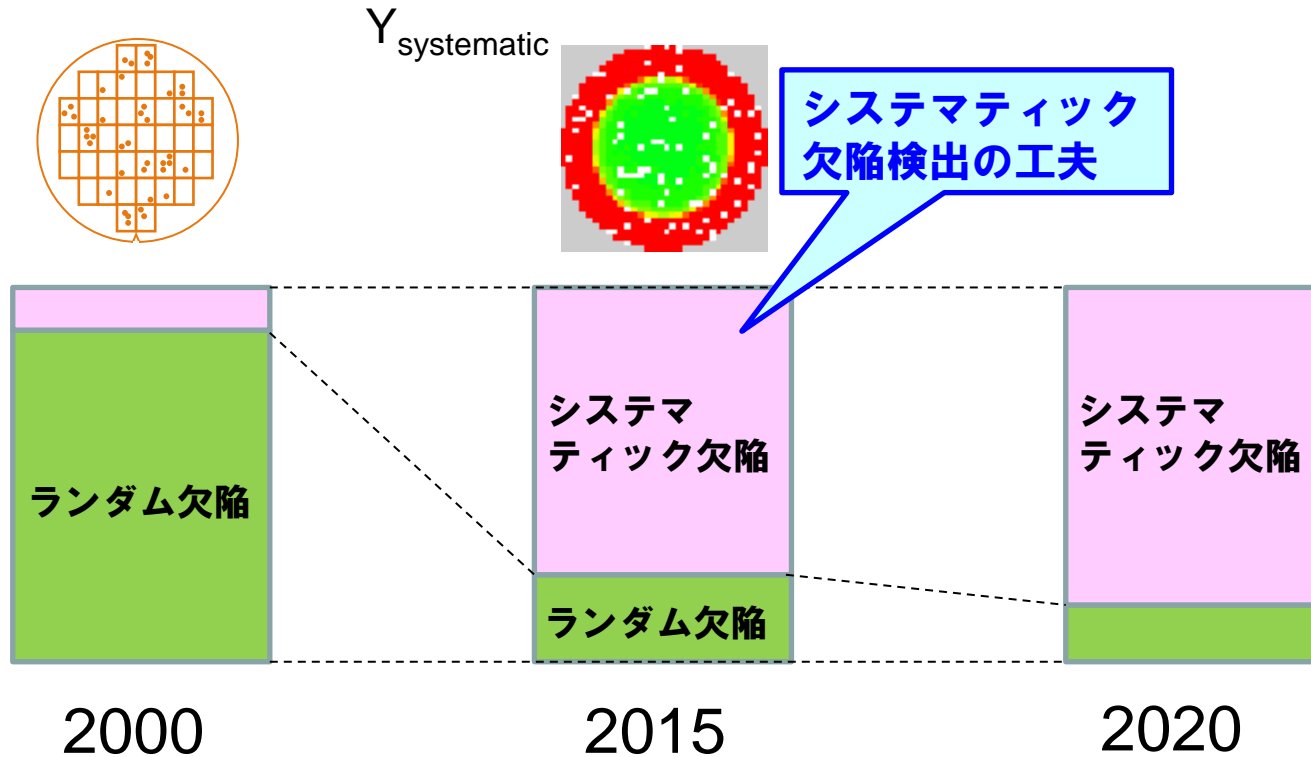
欠陥検出のロードマップ活動の取り組み

現在の欠陥検出のテーブル（YE5-YE7）は、システムティック・ランダム欠陥双方を対象として設定されているが、微細化の進行により、従来の延長線上での欠陥サイズや計測時間のロードマップは破たんしている。問題となるシステムティック欠陥は見えない、又は分離できない。

Year of Production		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)		22	20	18	17	15	14.2	13.0	11.9
光学式	Patterned Wafer Accuracy (nm) at resolution [A]	320	280	250	230	155	180	160	140
	Redetection: minimum defect size (nm) [E]	9	8	7	7	6	5.7	5.2	4.8
	Number of defect types [B]	10	10	10	10	10	10	10	10
	Speed (defects/hours) w ADC [D]	720	720	720	720	720	720	720	720
	Speed w/elemental (defects/hours)	360	360	360	360	360	360	360	360
	Number of defect types (inline ADC) [C]	10	10	10	10	10	10	10	10

SEM式		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Equivalent Sensitivity in PSL Diameter (nm) at 90% Capture Rate * [F,G]									
	Sensitivity for voltage contrast application without speed requirement (nm)	22	20	18	17	15	14.2	13.0	11.9
	Sensitivity for physical defect detection (nm)	27	27	27	27	27	26.8	26.8	26.8
	Speed for voltage contrast applications [cm2/hr]	300	300	300	300	500	500	500	500
	Speed for physical defect detection [cm2/hrs]	50	50	50	100	100	100	100	100
	CoO HARI (\$/cm²)	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388

問題となる欠陥の比率の推移（イメージ）

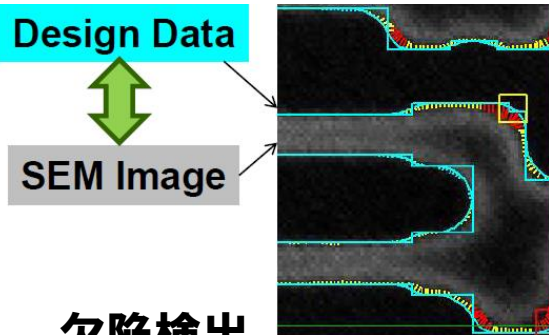


システムティック欠陥の検出や分類のため手法が多様化、従来の検出感度やスループット等のテーブルでは対応不可能に。またTEG等での電気的測定結果や装置情報を使用した管理への移行や併用も重要になってくる。

システムティック欠陥検出・管理のしくみの例

開発・障害調査

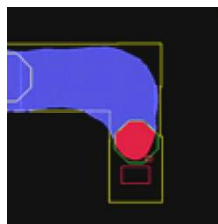
量産・管理



欠陥検出

- DB (CAD) との比較
- 設計情報の利用
 - Hot Spot
 - 回路Type

シミュレーション、FA等によるHot Spot検出



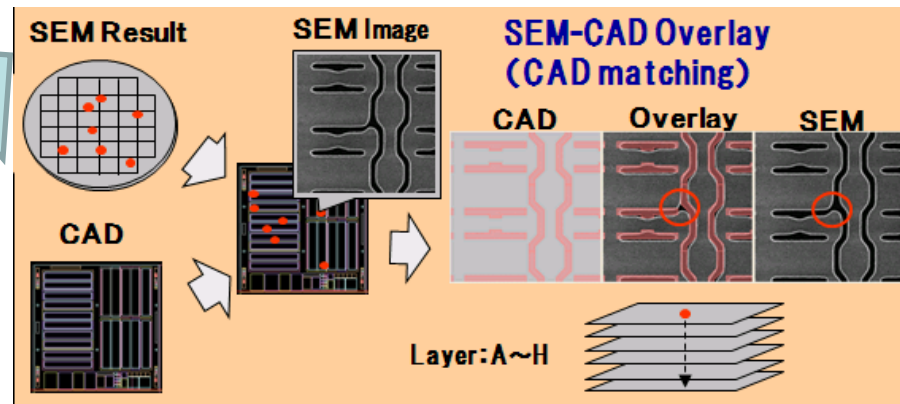
座標や検出手法情報

座標情報



NGR System

RS6000 SDC System

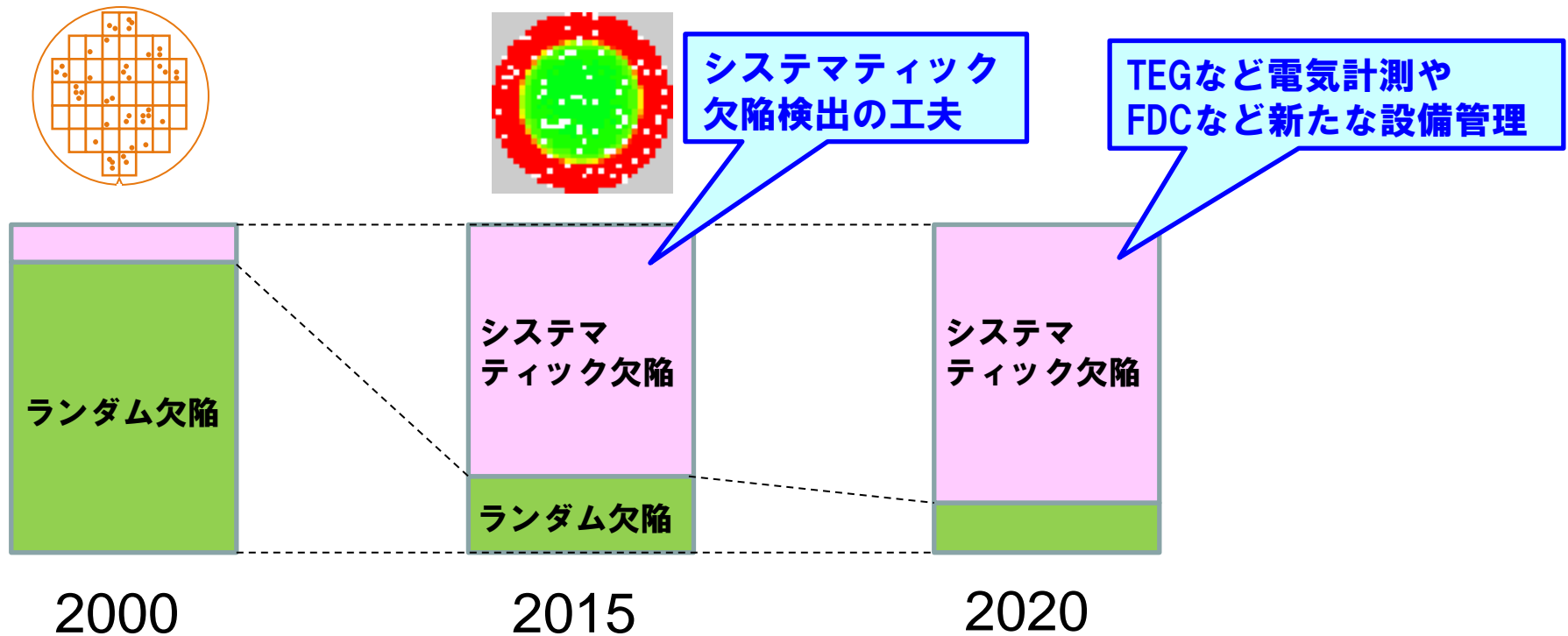


システムティック欠陥検出・管理の手法は多様化しており、それらのレビューが今後必要

イメージについてNGR社及び日立ハイテクノロジーズ社資料より借用

STRJ WS: March 6, 2015, Yield Enhancement

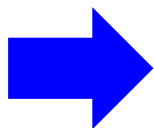
問題となる欠陥の比率の推移（イメージ）



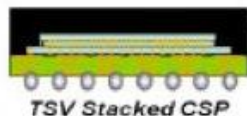
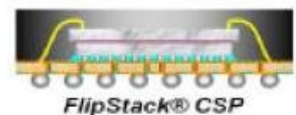
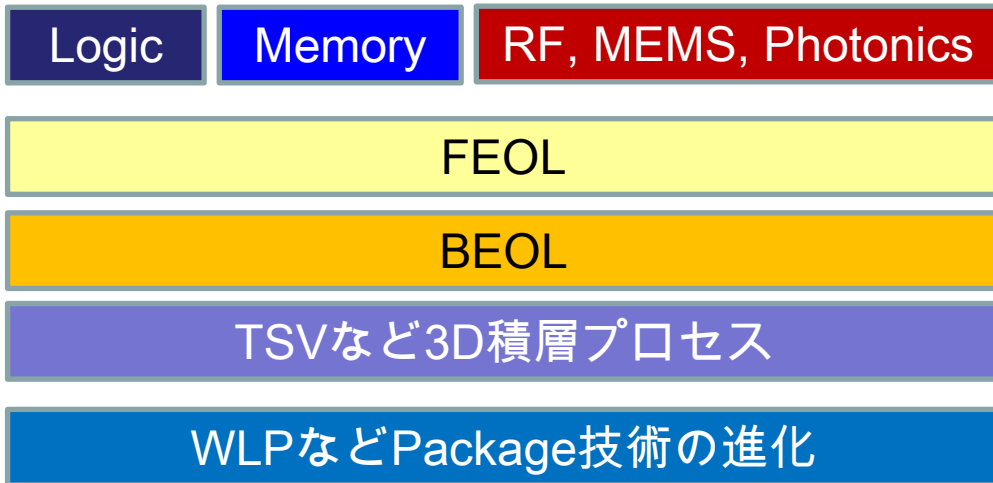
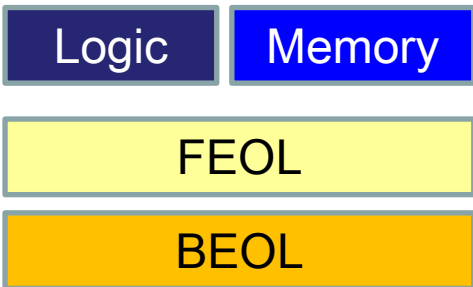
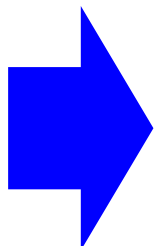
システムティック欠陥の検出や分類のため手法が多様化、従来の検出感度やスループット等のテーブルでは対応不可能に。またTEG等での電氣的測定結果や装置情報を使用した管理への移行や併用も重要になってくる。

製品やデバイス構造も多様化

PCが牽引
More Moore



IoTの時代
More than Moore



**対象となるエリアも増加し
それぞれの要求項目も
多様化している**

ITRS 2.0:
Heterogeneous Integration

欠陥検出のロードマップ活動の取り組み

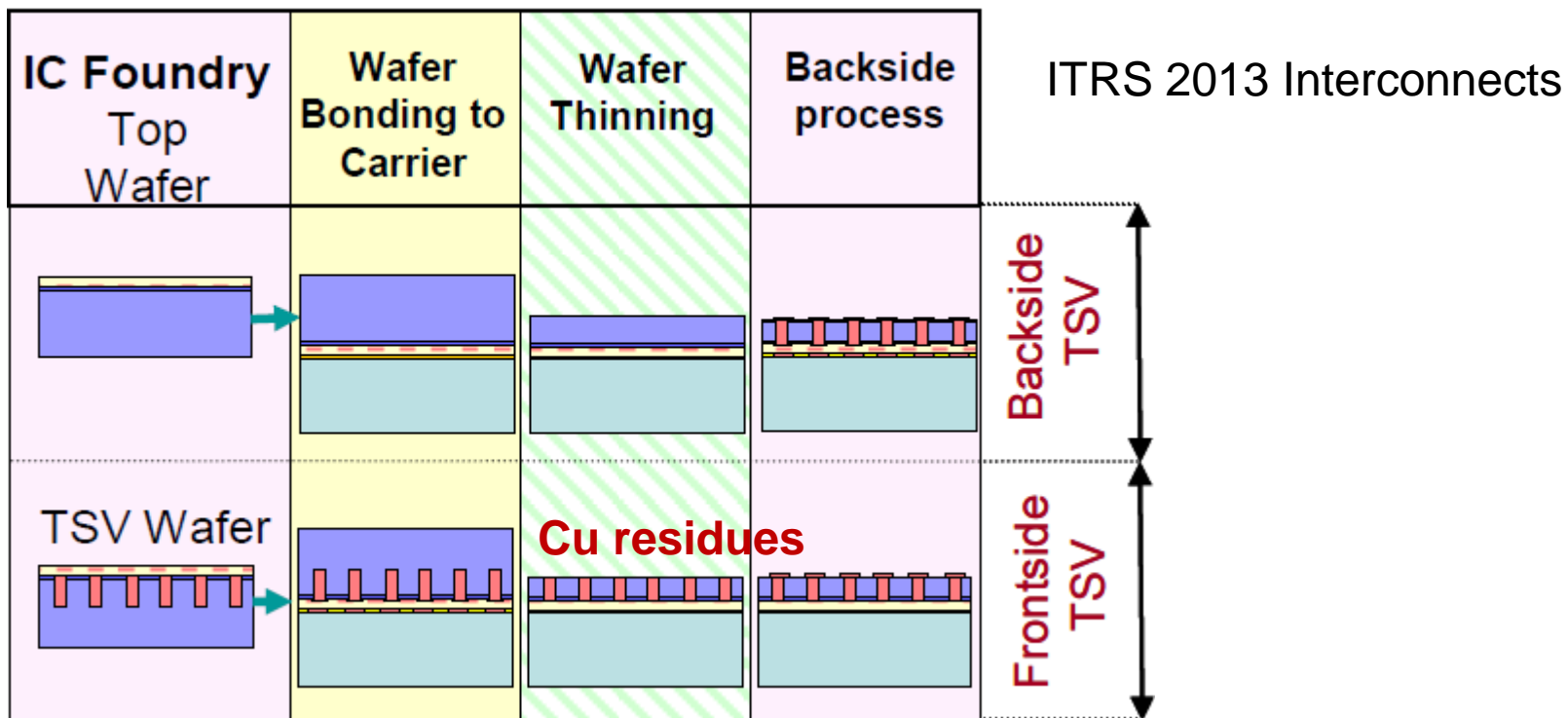
現在の欠陥検出のテーブル（YE5-YE7）は、システムティック・ランダム欠陥双方を対象として設定されているが、微細化の進行により、従来の検査では見えないシステムティック欠陥の比率が増加し、従来の延長線上での欠陥サイズや計測時間のロードマップは破たんしている。

昨年報告したように、システムティック欠陥の効率的な検出が一つの進化の方向である。

他方、TEG等の電気計測や装置からのプロセスデータ（FDC）と連携した、歩留管理も重要な課題である。

一方、製品やデバイス構造の多様化にともない、3D積層プロセスにおける新たな検査要求がでてきている。

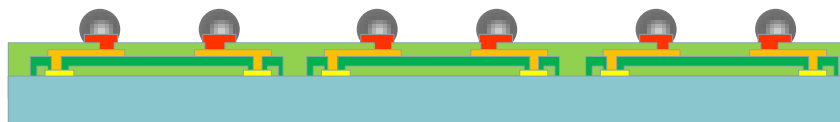
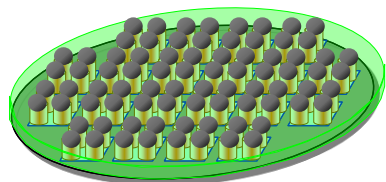
各種TSVプロセスと課題



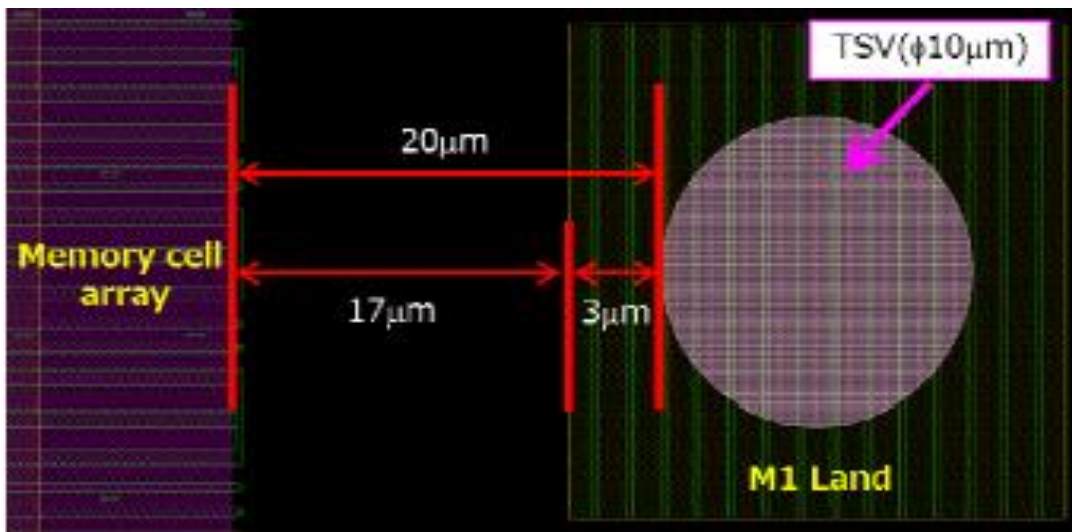
WL-CSP Bumpプロセス

STRJ WS 2013 実装WG

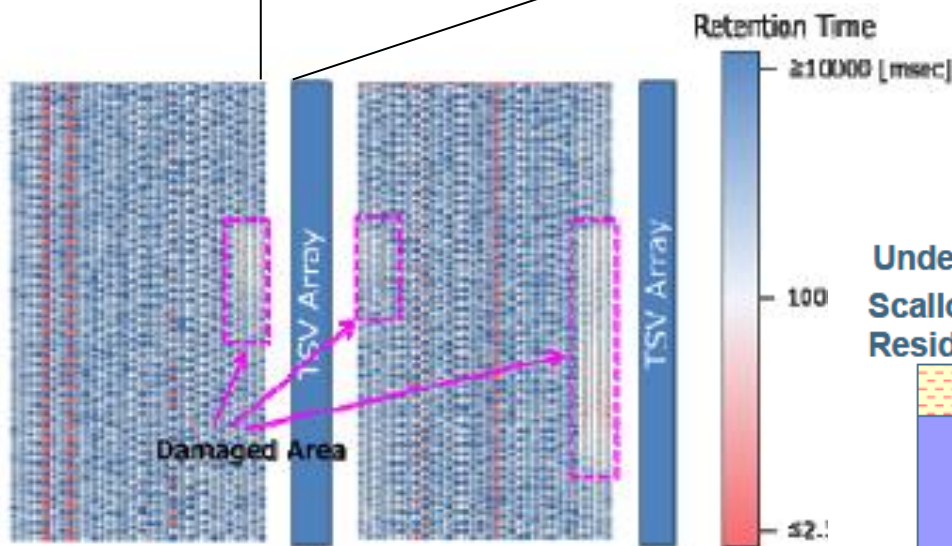
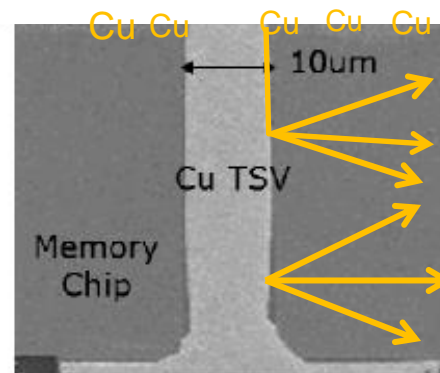
Pad, Bumpの形状および欠陥制御



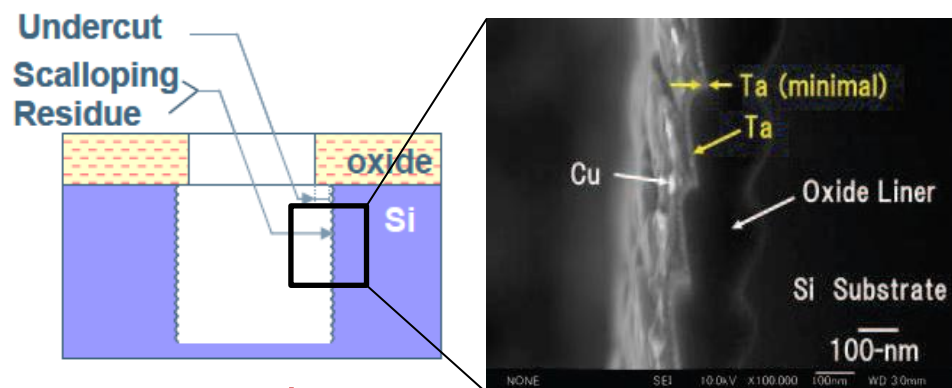
TSV middleプロセスにおけるCu汚染の影響



K. Lee, IRPS 2014, 3E-4



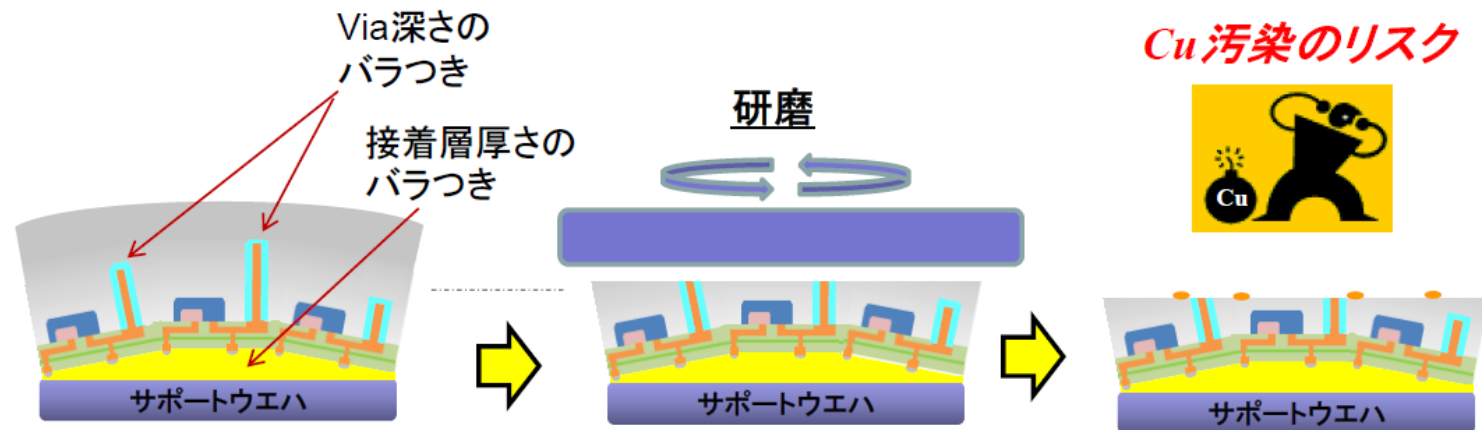
(d) 300°C annealing



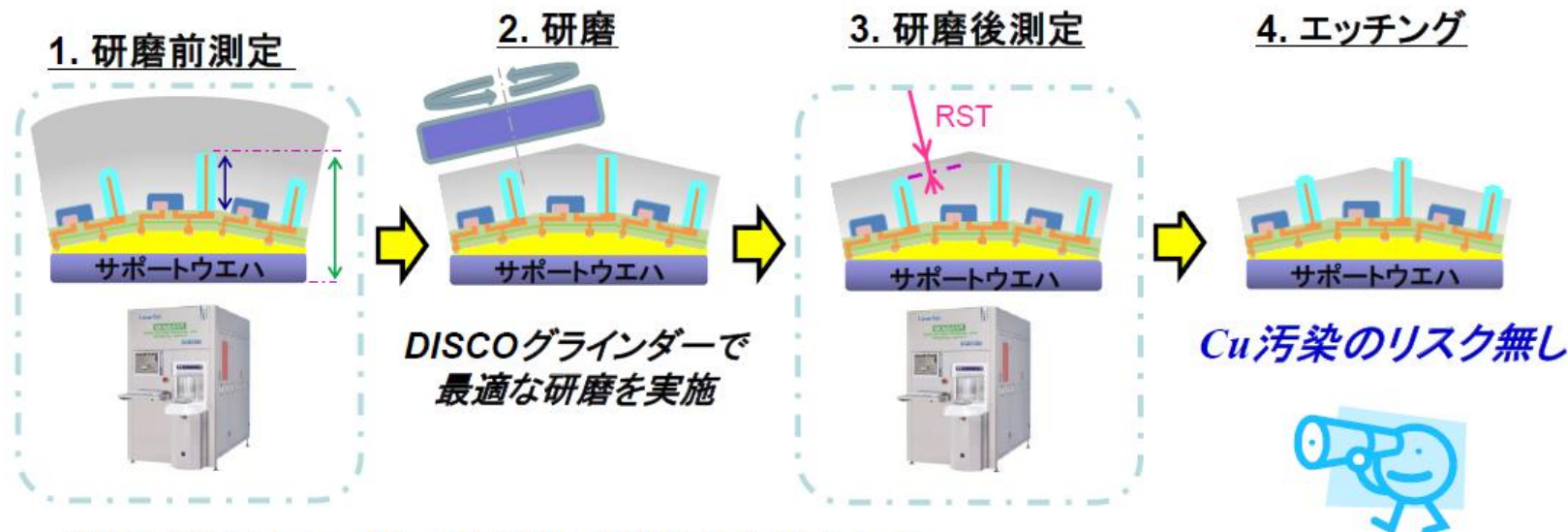
DRAM retention timeの劣化

研磨工程においてTSV Cuが表面に出るリスク

Lasertec様資料



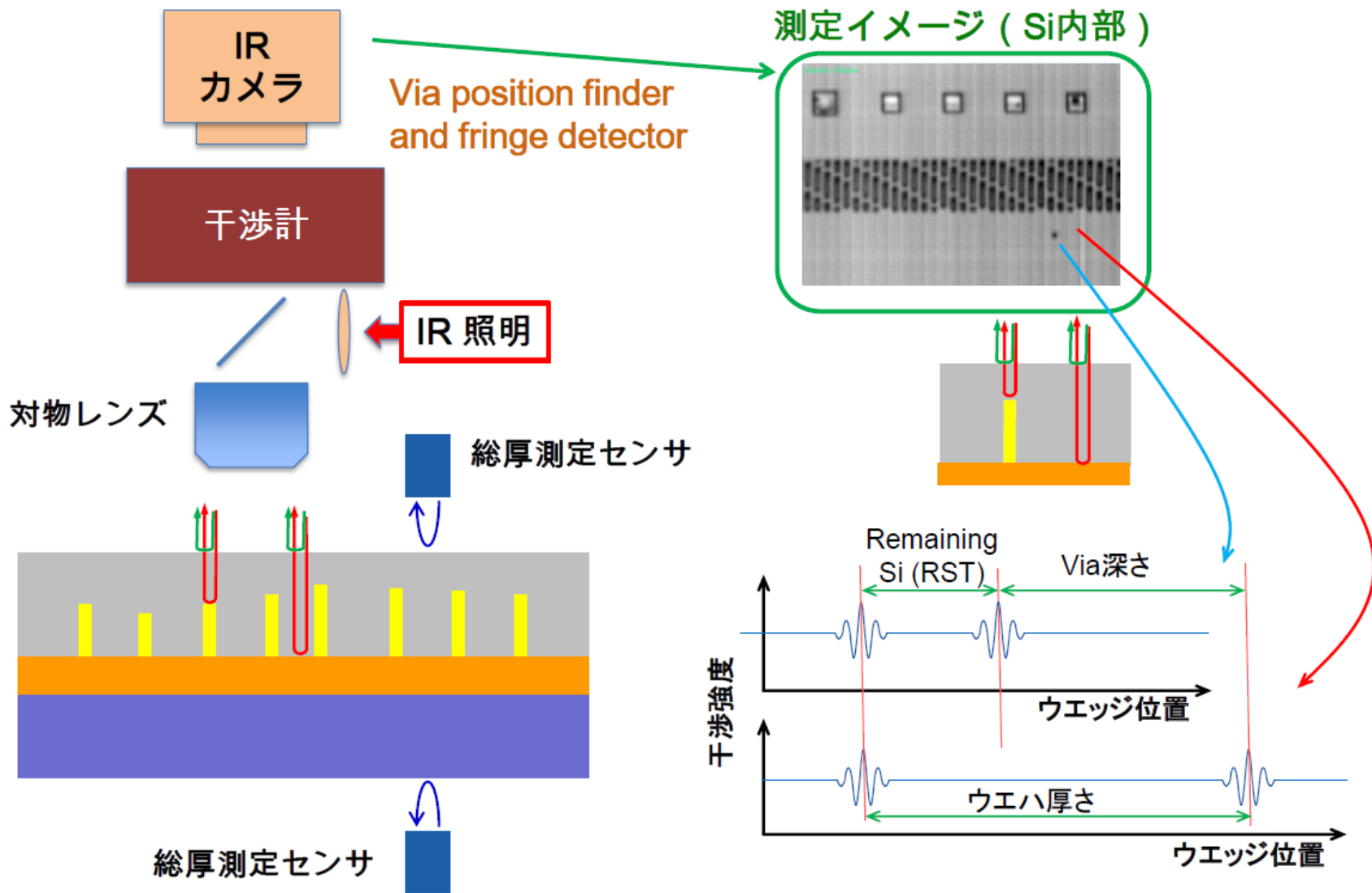
測定無しでは、Viaの直前で研磨を止められない。



測定することで、Viaの直前で研磨を止められる。

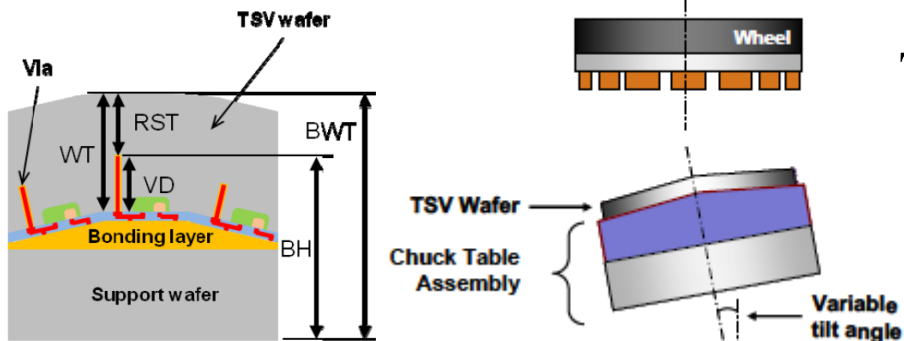
研磨前のTSV高さ(残留Si厚)検査技術

Lasertec様資料

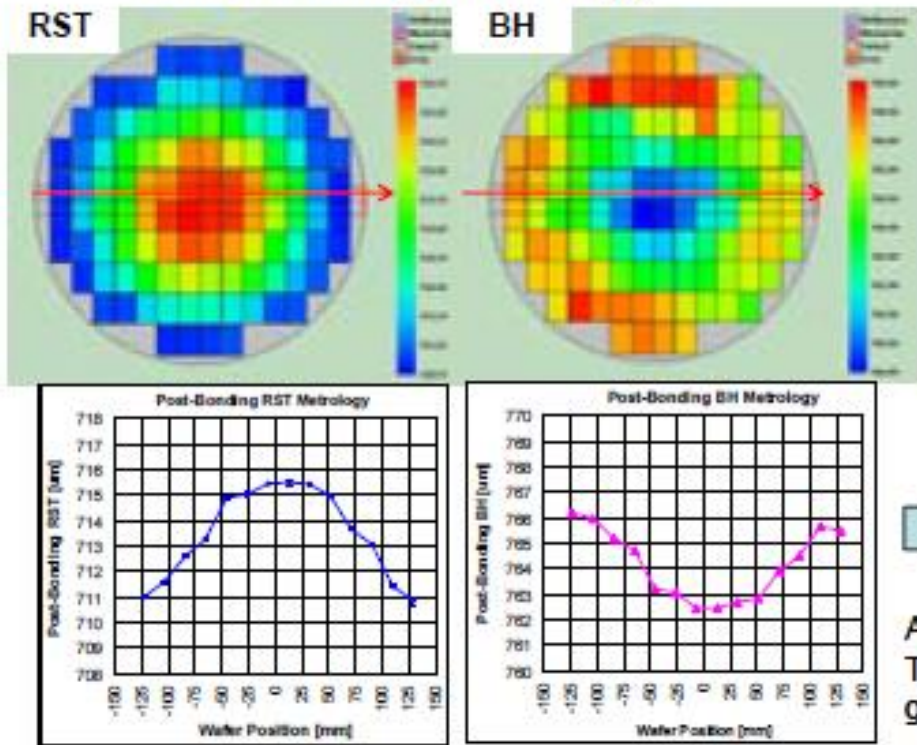


研磨後のTSV高さ(残留Si厚)分布改善

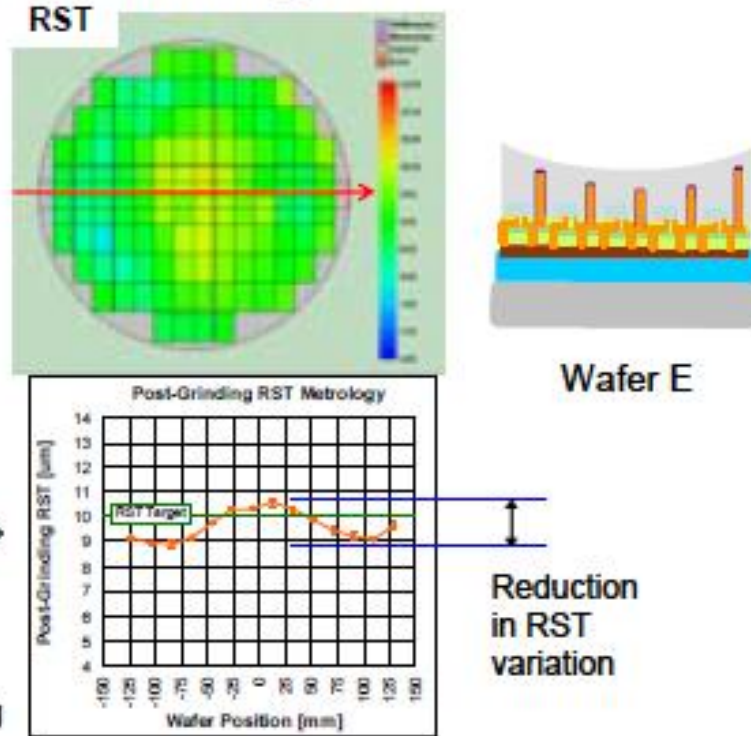
T. Alvanos, et.al, ECTC 2014



Post-Bonding Metrology



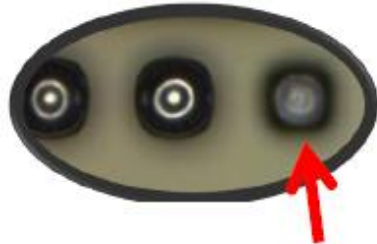
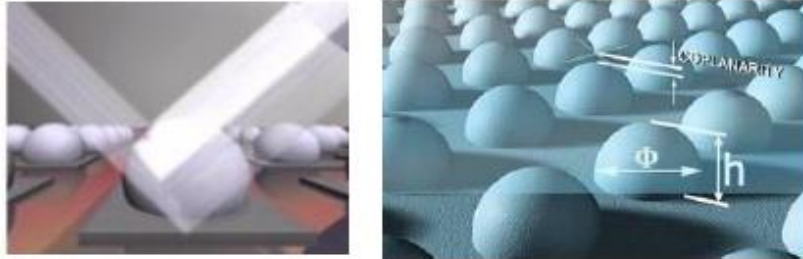
Post-Grinding RST



Auto-TTV grinding

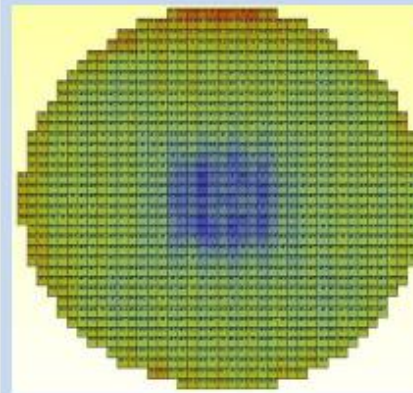
高速三角測量による μ -Bump(高さ、幅)の全数検査

ウエハ全面のバンプ全数高さ検査が可能

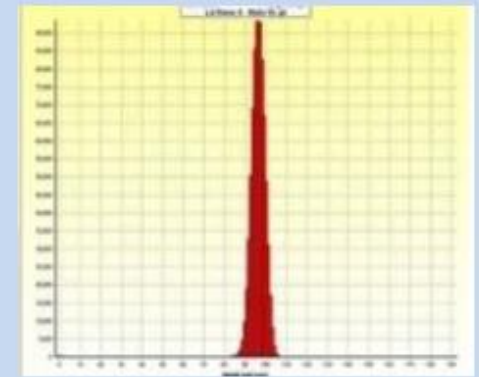


二次元検査(直径)では見逃してしまう
不良バンプが存在

●100万個レベルの計測例



面内分布

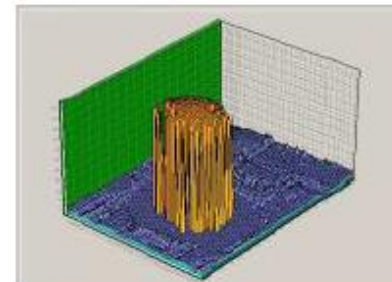
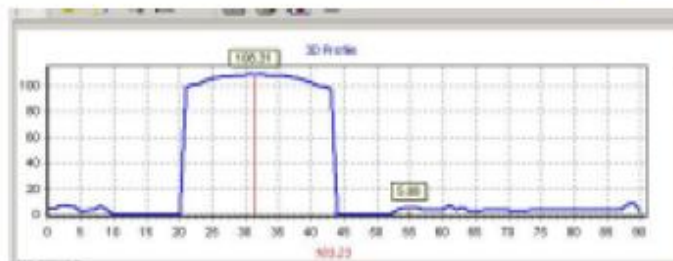


高さバラつき分布

データをフィードバックすることで品質管理および
改善に活用が可能

コンフォーカル(共焦点)方式によるバンプ高精度計測

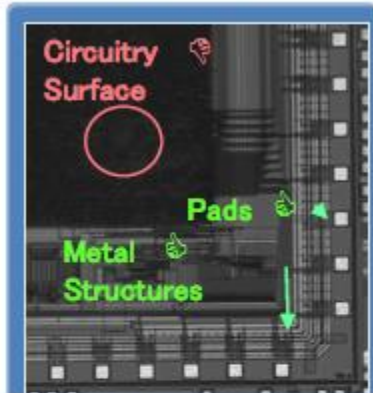
プロファイル確認によるダブルチェックが可能



さらに、同じプラットフォームで、二次元検査が可能

明視野/暗視野Dual照明同時照射による欠陥検出

明視野のみ画像例



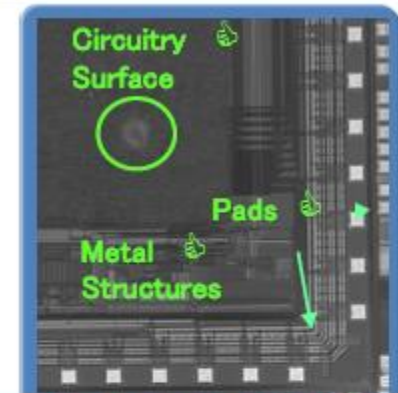
パッドおよびメタル部: NG
回路表面部: OK

暗視野のみ画像例



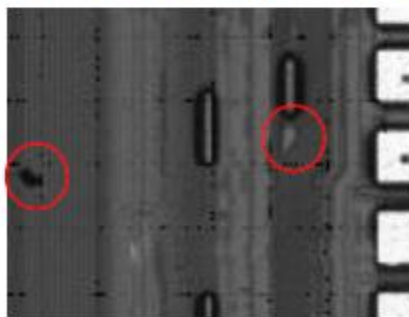
パッドおよびメタル部: OK
回路表面部: NG

明視野/暗視野同時照射

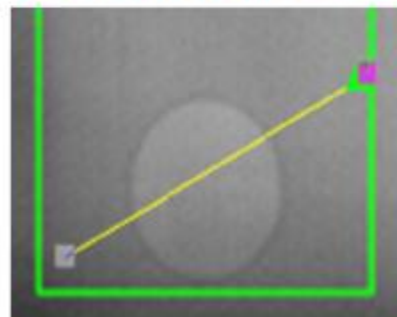
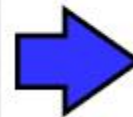


全てのパターン上で
欠陥を認識

1回の検査で欠陥種に適したアルゴリズム/検査感度での欠陥検出
アルゴリズム例 : コントラスト比較、周辺ピクセル比較...など



微小欠陥

低コントラスト欠陥
(染みなど)

グレイレベル



面荒れ、色ムラと低コントラスト欠陥
の切り分けも可能

Yield Enhancement のロードマップの方向性

- 純水および薬液中の不純物はPoint of Process (POP)で管理値を設定する必要がある。
- 純水中の不純物濃度の低減ばかりを追及することよりも、実際の半導体微細パターン洗浄工程で使われるウェーハ乾燥用のIPA中の汚染濃度の実態の把握、管理値の見直しをする必要がある。
- FEOL/BEOLの欠陥検査は、感度や計測時間改善だけではなく、システムティック欠陥抽出の効率化が重要で、一方、3D積層プロセスにおけるTSV関連、 μ -Bumpなど新たな検査要求への対応が必要である。

用語集

CIA: Characterization, Inspection & Analysis 検査、分析、特徴付け

DB: Data base データベース

FDC: Fault detection & classification 異常検出と分類

TSV: Through Si Via Si貫通接続

WL-CSP: Wafer level chip size package ウェハレベルパッケージ

RST: Remaining silicon thickness 残留Si厚

BWH: Bonded wafer stack thickness 接合ウェハ合計厚

BH: Base height = (BWH-RST)

TTV: Total thickness variation 合計膜厚ばらつき

WECC: Wafer Environmental Contamination Control ウェーハ環境汚染制御

UPW : Ultra Pure Water 超純水

UF : Ultra Filter 限外ろ過フィルター

IPA: Isopropyl alcohol イソプロパノール

POS : Point of Supply 供給ポイント

POD : Point of Delivery 受渡ポイント

POC : Point of Connection 接続ポイント

POE : Point of Entry 入口ポイント

POU : Point of Use 使用ポイント

POP : Point of Process プロセスポイント