

Litho計測の現状と課題(計測WG) & 故障解析SWG活動状況報告

Litho計測の現状と課題 (計測WG)

メンバー

河村栄一	(富士通マイクロエレクトロニクス)
山崎裕一郎	(東芝)
上澤史且	(SONY)
清水澄人	(パナソニック)
横田和樹	(NECEL)
市川昌和	(東京大学)
水野文夫	(明星大学)
小島勇夫	(産総研)
池野昌彦	(日立ハイテクノロジーズ)
西萩一夫	(堀場製作所)

2010 ITRS update



		2010	2013	2016	2019
	Flash 1/2 pitch (nm)	32	22	16	11
	DRAM ½ Pitch (nm)	45	32	22	16
	MPU Printed Gate Length (nm)	41	28	20	14.0
	MPU Physical Gate Length (nm)	27	20	15.0	12.0
	Wafer Overlay Control (nm) - 20% DRAM	9.0	6.0	5.0	3.0
	Wafer Overlay Control Double Patterning (nm)	6	4	2	1
	Lithography Metrology				
Gate	Physical CD Control (nm) Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance	2.8	2.1	1.6	1.2
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3σ, nm) at P/T = 0.2	0.55	0.42	0.31	0.25
	Etched Gate Line Width Roughness (nm) <8% of CD	2.1	1.6	1.2	1.0
Dense Lines	Printed CD Control (nm) Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance	3.3	2.3	1.7	1.1
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3s, nm) at P/T = 0.2	0.7	0.5	0.4	0.3
Double Patterning Overlay Metrology					
Double Exposure and Etch - Process Range (nm)		6.4	5.1	4.0	3.2
Double Exposure and Etch - Uncertainty (nm)		1.3	1.0	0.8	0.6
Spacer PEE process					
First pass CD control (after etch) - Process Variation (nm)		3.0	2.4	1.9	1.6
First pass CD control (after etch) - Uncertainty (nm)		0.6	0.5	0.4	0.3
Front End Processes Metrology					
High Performance Logic EOT equivalent oxide thickness (EOT), nm		0.65	0.5	0.5	0.5
Logic Dielectric EOT Precision 3σ, nm		0.0026	0.002	0.002	0.002
Interconnect Metrology					
Barrier layer thick (nm)		3.3	2.4	1.7	1.3
Void Size for 1% Voiding in Cu Lines		4.5	3.2	2.2	1.6
Detection of Killer Pores at (nm) size		4.5	3.2	2.2	1.6

P/T: Precision to Tolerance ratio

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 4, 2011, WG14 Metrology

Overlay計測マーク等に関する要求

New lines for 2009/2010 ITRS in table MET3, by Bunday, based on ISMI Member Company feedback

Year of Production	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f)	<u>32</u>	<u>25</u>	<u>20</u>	<u>15.9</u>	<u>12.6</u>	<u>10.0</u>	<u>8.0</u>	<u>6.3</u>
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	45	36	28	22.5	17.9	14.2	11.3	8.9
Target Pad Size for OCD/scatterometry or Diffraction Overlay, or Target Size for Optical overlay (max size for either, square pad, size in microns)	40	34	30	26	20	16	13	10
In-die Micro-Targets for Overlay or OCD (target pad size in microns). Dimension includes all needed exclusion.	10	10	5	2	2	2	2	2
Move-Acquire-Measure Time for CD or Overlay (MAM time, seconds per measurement)	1.0	1.0	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5

OCD: Optical Critical Dimension(光を用いた最小線幅計測)

2010年度活動概要

ITRSでの活動内容、Topics

1. 将来必要となる計測技術の開発ロードマップを提示
量産開始(2社)の8年前に研究ツール、6年前に α ツール、4年前に β ツール、2年前に量産ツール(精度要)が必要
2. Litho計測では、CD計測の将来技術調査を実施(米ISMI)
2010/6月~10月の間にsurvey実施。結果は2011年版に反映
3. Overlay計測ロードマップについて検討
計測ターゲットのサイズと計測点数に対して新たな要求
4. ERD/ERM X-cutにて、解析技術ニーズが増大

国内活動

1. Lithographyの計測技術調査
2. 故障解析タスクフォースに参加、情報の共有

CD: Critical Dimension(最小寸法), ISMI: International SEMATECH Manufacturing Initiative
ERD: Emerging Research Device(新探求デバイス), ERM: Emerging Research Material(新探求材料)

Litho計測調査の背景

- EUVが遅延する状況下におけるDouble Patterningの重要性が増加。Spacer方式はOverlay精度に直接影響されないが、他の方式はOverlay精度がcritical。⇒ Overlay計測技術調査
- 微細化が継続的に進む中でComputational Lithographyの高精度が重要(今まで補足できていないhot spot and/or Double Patterning 対応)。Computational Lithographyのモデルの高精度化と共に計測によるcalibrationの重要性が増加。⇒ Contour計測技術調査
- ISMIもNext Generation CD Technology Survey (June 2010) 公表 ⇒ CD SEMの空間分解能及び OCDのモデル予測精度が、微細化にどこまで対応できるかgray, 一方、空間分解能の高いCD-SAXSやHe-Ion顕微鏡に関する実用性、計測安定性、商用化が現時点でgray。

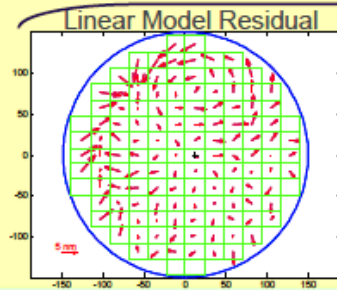
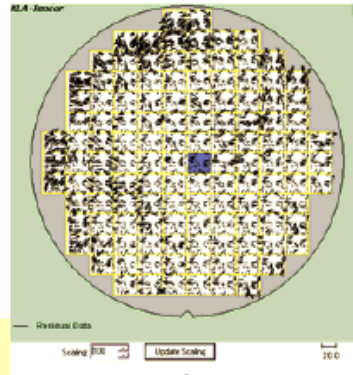
OCD: Optical Critical Dimension(光を用いた最小寸法計測)

CD-SAXS: Critical Dimension-Small Angle X-ray Scattering(小角X線散乱)

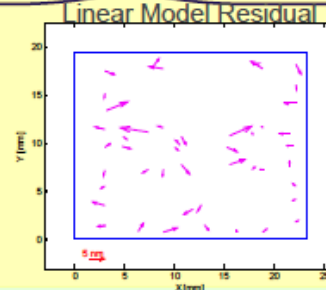
Overlayの要求と現状

- Single露光に関しては、22nm世代まで Overlay計測の要求値のcolorationは白色で 当面問題無し。
- Double Patterning技術の必要性に応じて、露光装置のoverlay制御技術の要求の加速と、対応する計測精度要求が高まっている。
- 現状使用されているDouble Patterningは Spacer方式のためoverlay律速になっていない。

Overlay補正モデルによる残渣の分解



+

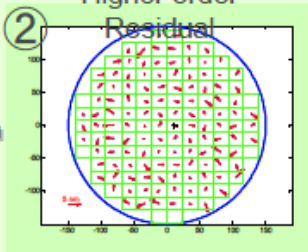


+

Random residual

① Wafer level H.O. terms

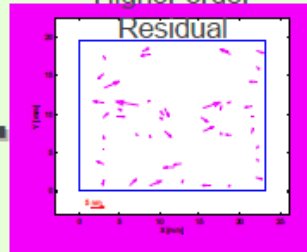
+



+

③ Field level H.O. terms

+



+

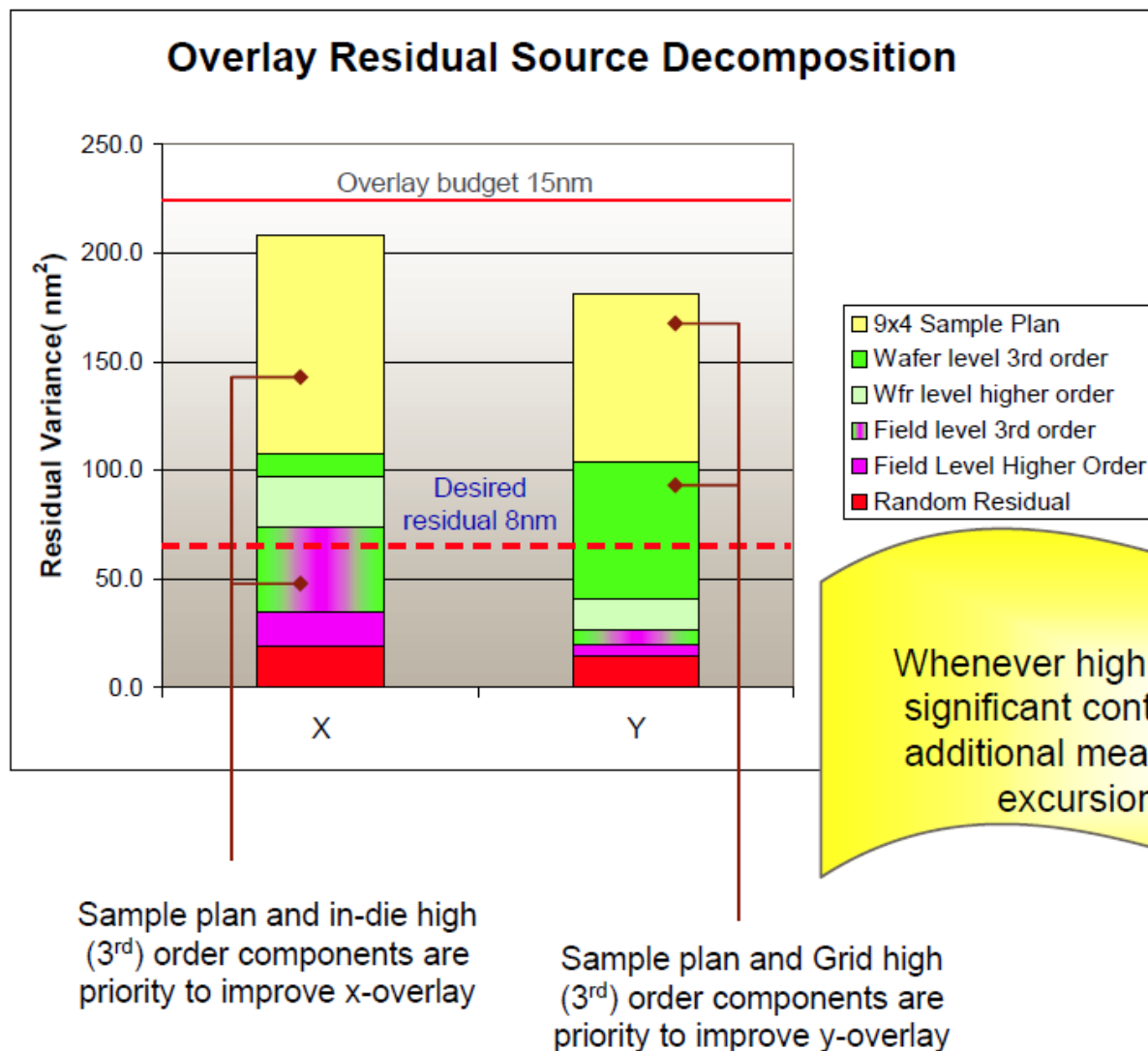
Random residual

Scanner H.O. correction

- ウェーハ、ショット内の高次の歪は、systematicな要因が安定している場合高次補正によって total overlay は抑制される

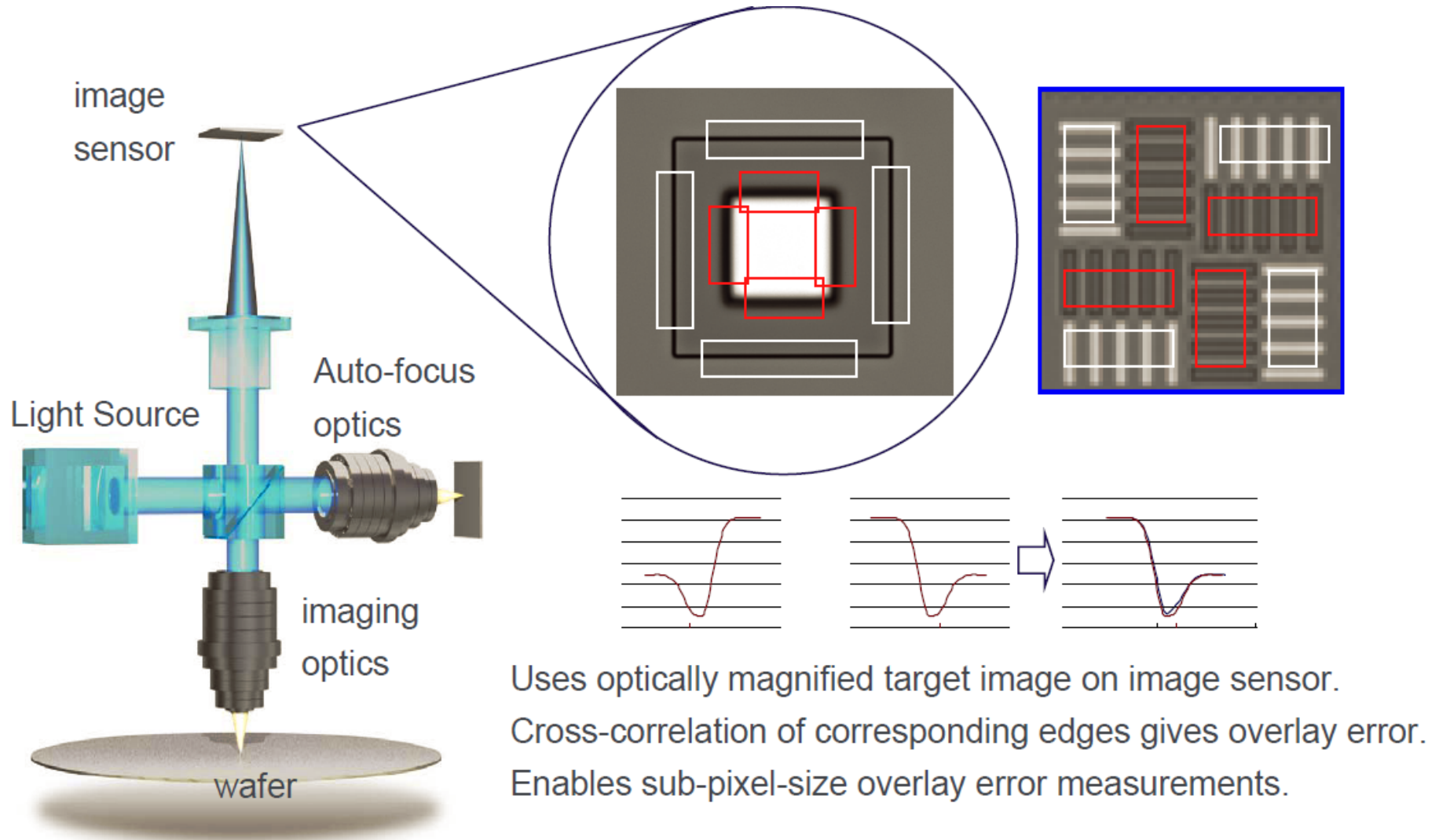
資料提供: KLA-Tencor

Overlay誤差因子の分散分析



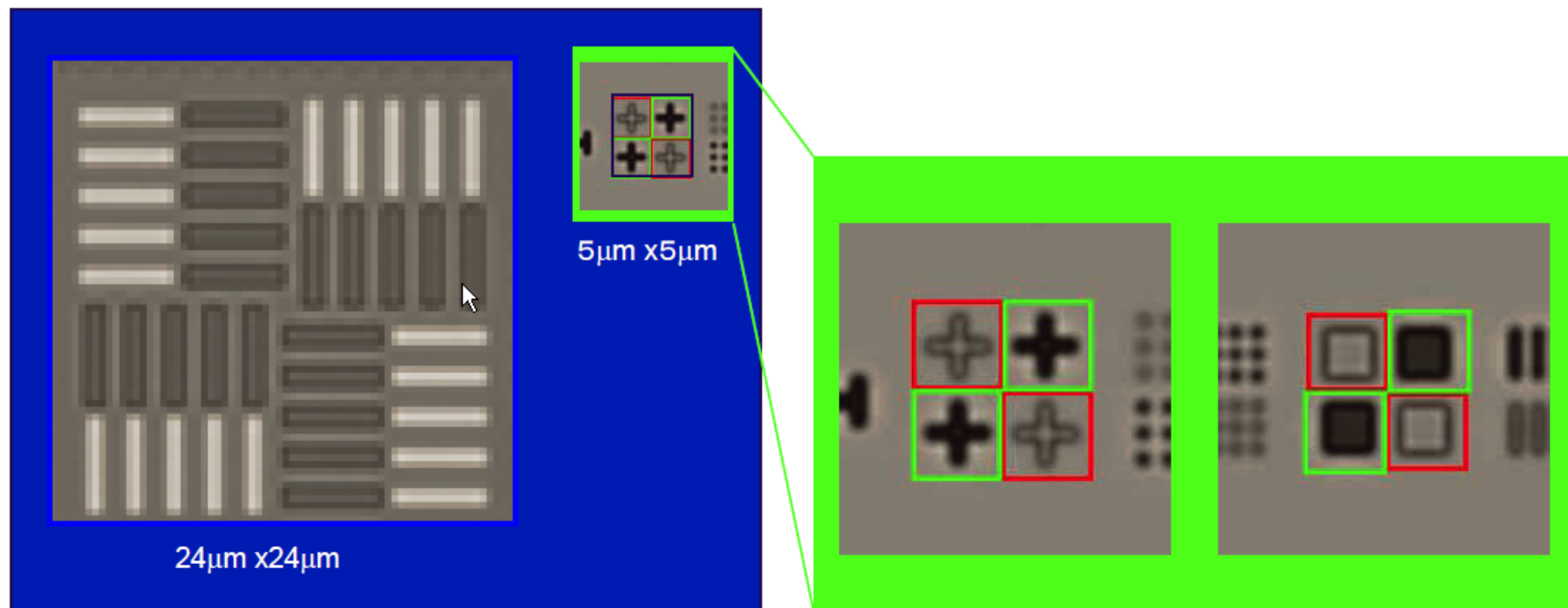
誤差因子の寄与率に応じ計測Sampling Planおよび補正の次数を決定する

光学式Overlay計測原理



- 位置ズレ計測は、主尺と副尺のパターンエッジの中心値の相対距離から算出される
- エッジ長が短いとエッジの揺らぎによる真のエッジ中心の位置精度が低下する

Overlay Targetの縮小事例



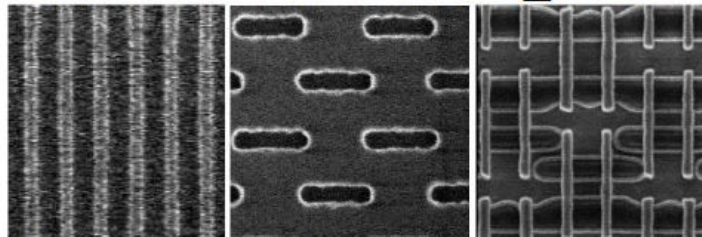
- In-die-markは縮小の可能性はあるが、LER等の影響で測定が困難なレイヤーでは計測精度との trade-off の関係にある

Contour計測の必要性

- 各種RET (Resolution Enhancement Technology; 超解像技術) に対応する正確なCD and/or 形状予測として Computational Lithographyの高精度化が期待されている。
- Computational Lithographyによる正確な3D予測による hot spot検出 (エッチング時のレジスト形状の考慮が必要な場合等)
- Double Patterning時のパターン分割に伴う最終合成パターンの予測、各プロセスステップにおける形状の検証
- 正確な3次元形状予測 (and/or LER; Line Edge Roughnessの考慮) をもとに TCADと連携し特性予測および、設計へのフィードバック

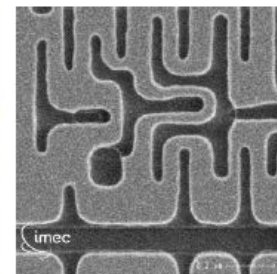
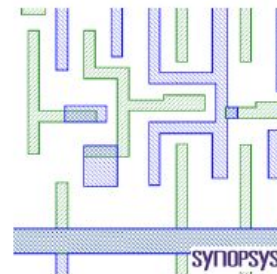
Computational lithography for Styles of DPT

- Line-end cutting DPT



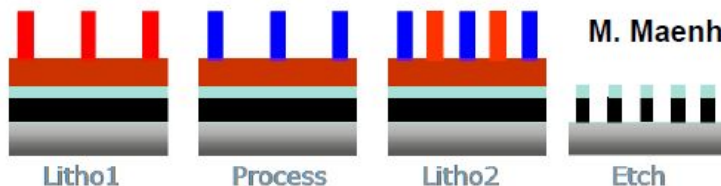
H. Haffner, 2008 Sematech Litho Forum

- Litho-etch-litho-etch



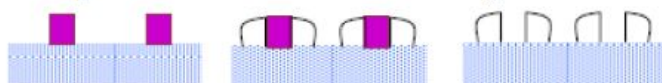
K. Lucas, SPIE 2008

- Litho-freeze-litho-etch



M. Maenhoudt, 2008 Sematech Litho Forum

- Spacer DPT (self-aligned DPT)

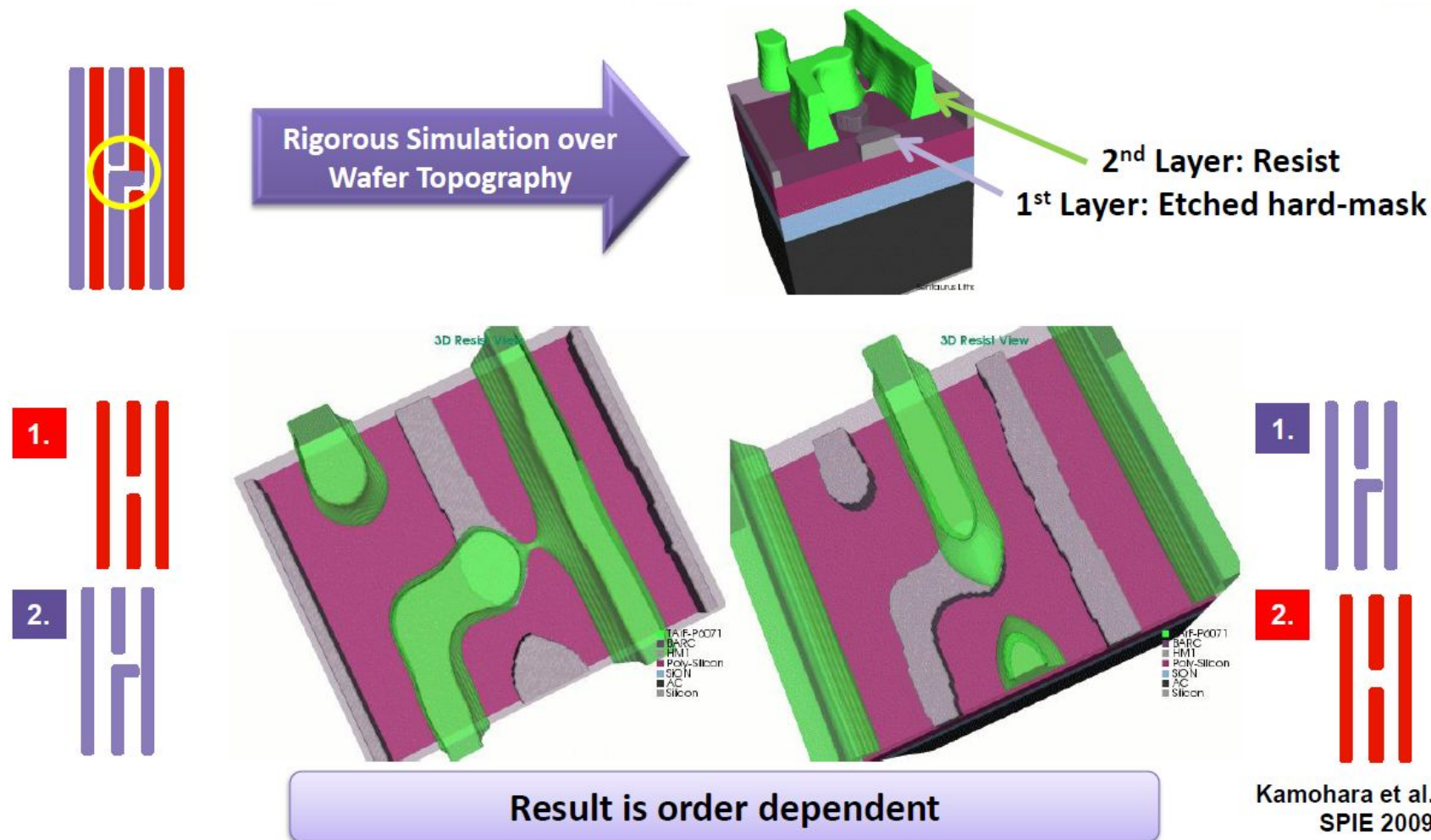


Inoue-san, 2008 Sematech Litho Forum

略語 DPT: Double Patterning(2重パターニング技術)

資料提供: Synopsys

Computational lithography (Pitch Split Strategy for DPT and Stitching)



略語 DPT: Double Patterning

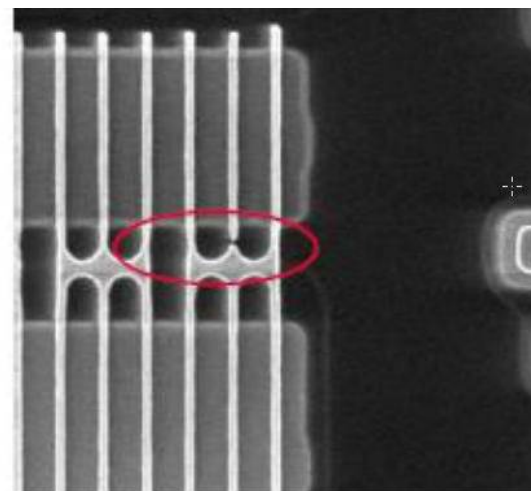
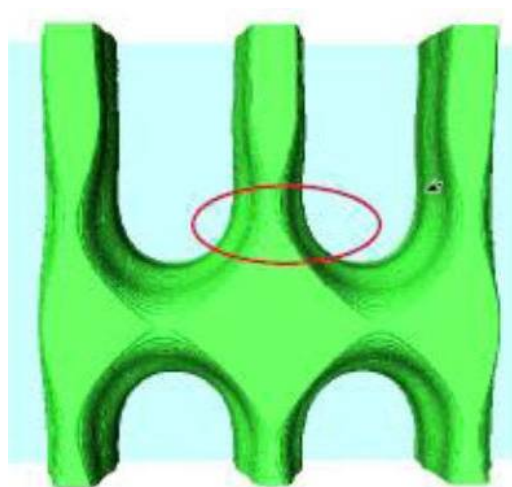
Work in Progress - Do not publish

資料提供: Synopsys

STRJ WS: March 4, 2011, WG14 Metrology 14

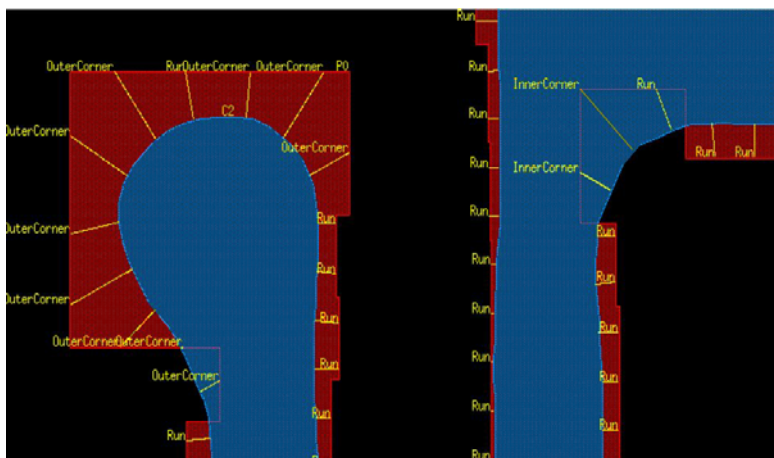
Computational lithography for Hot Spot

3次元形状のHot Spot抽出 ⇒



レジストパターン ⇒

エッチングパターン



⇒ 出来上がりと
GDSとの比較

- エッチングまで含めたHot Spot抽出が必要な可能性の検討等

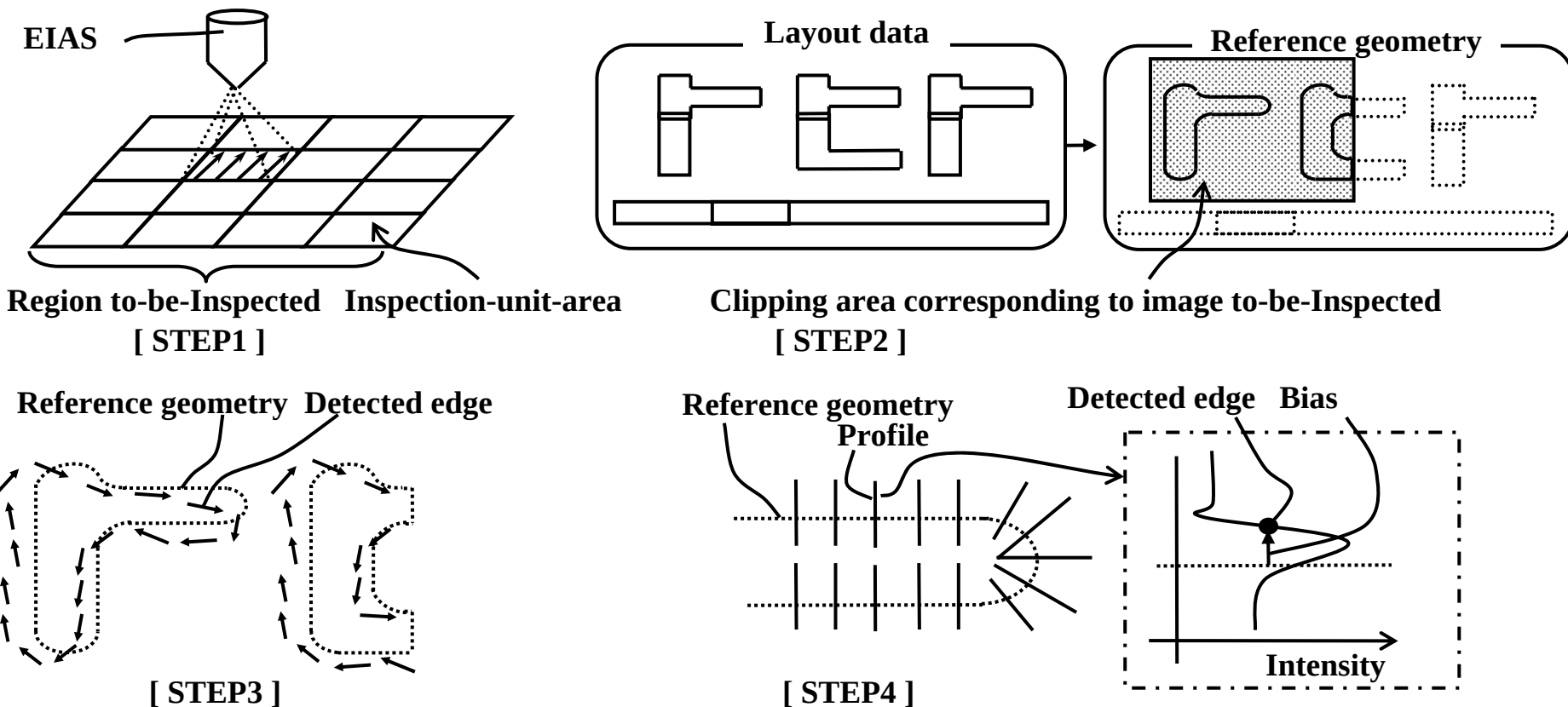
Metrology for Calibration of Computational Lithography

- チップ全域におけるDICD, FICD Contour Metrology 検証の必要性(従来のSamplingとの比較検証)
(参考; 2007年度STRJ Workshop & 年度報告書)
- マスク全域におけるMask FICD Contour Metrology 検証の必要性
- 3D Metrology for 3D calibration of Computational Lithography ⇒ GI-SAXS (参考; 2009年度年度STRJ Workshop, 年度報告書)、SEM画像Profileからの形状推定(参考; 2007年度STRJ Workshop & 年度報告書)

DICD: Development Inspection Critical Dimension(現像後の最小パターン寸法)

FICD: Final Inspection Critical Dimension(工程毎の最終検査段階の最小寸法)

広視野SEM検査技術 (分解能とスルーフットとのバランス)



Landing energy: 40 to 3000V

Probe current : 500pA to 10nA (Verification Mode), 10pA to 1nA (High Resolution Review Mode)

Pixel size : 2nm to 20nm

FOV per step : up to 200 μm square (0.01% field linearity), 16000 by 16000 pixels

Sampling rate : 200 M pixel/sec

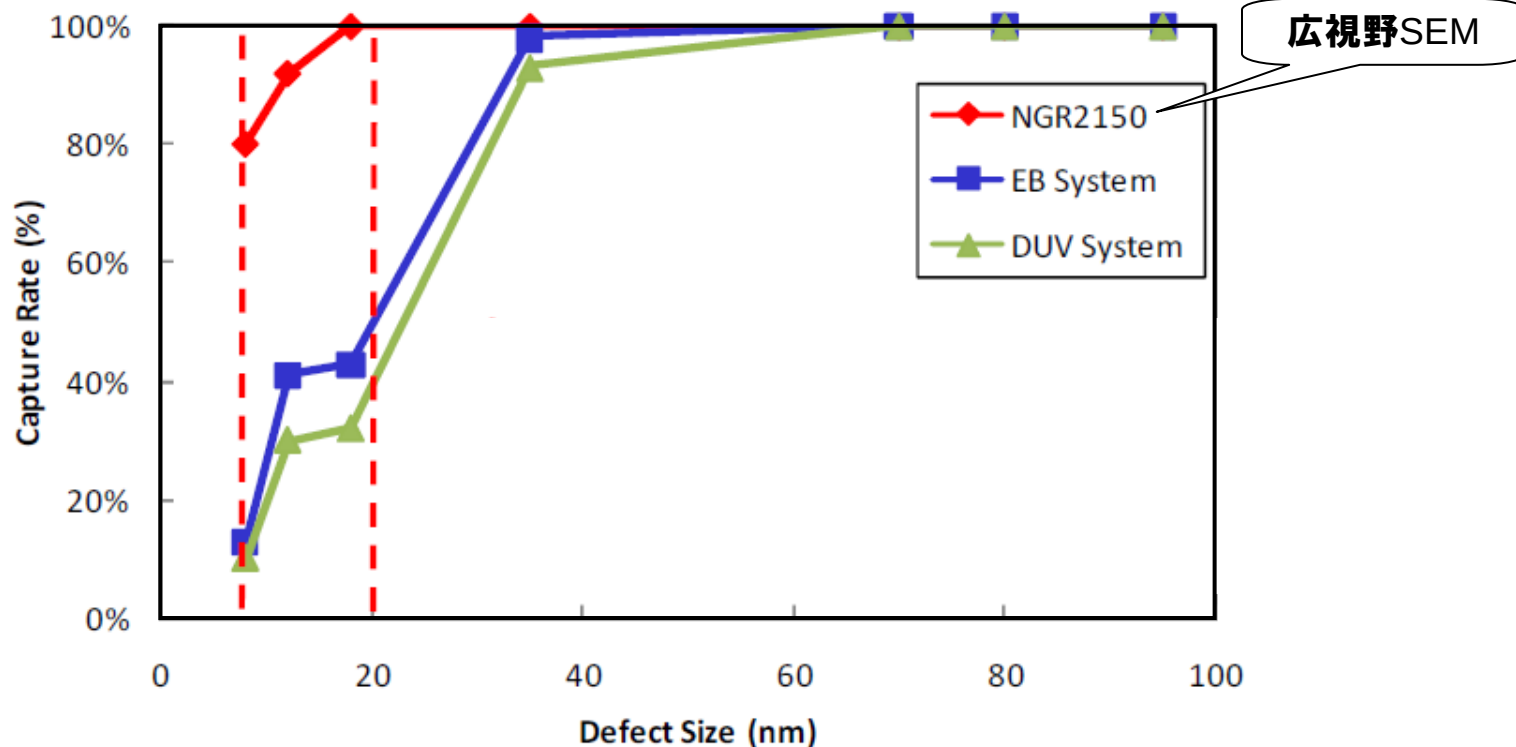
提供: NanoGeometry Research Inc.

広視野SEM検査技術 (感度比較)

■ Wafer: 3Xnm Programmed wafer

■ Layer: Gate

■ Target Defect: Short / Open



Capture Rate=80% for 8nm defect

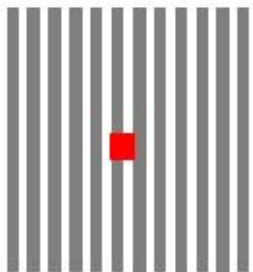
広視野SEMで3Xnm世代の欠陥検査が可能な状況

提供: NanoGeometry Research Inc.

広視野SEM検査技術 (観察対象の比較)

Pin-point measurement

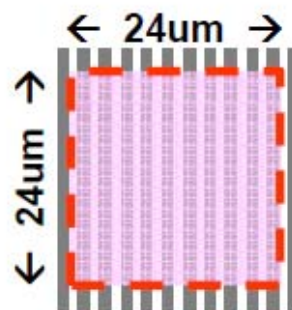
Ex.) CD-SEM



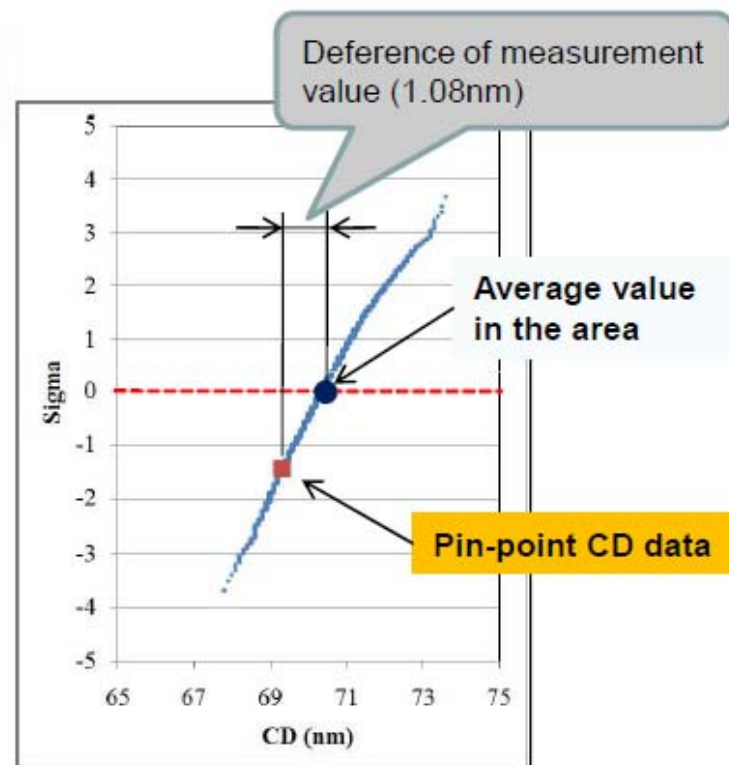
 Pin-point measurement

Mass CD measurement

Ex.) NGR / OCD / CD-SEM(ACD機能)



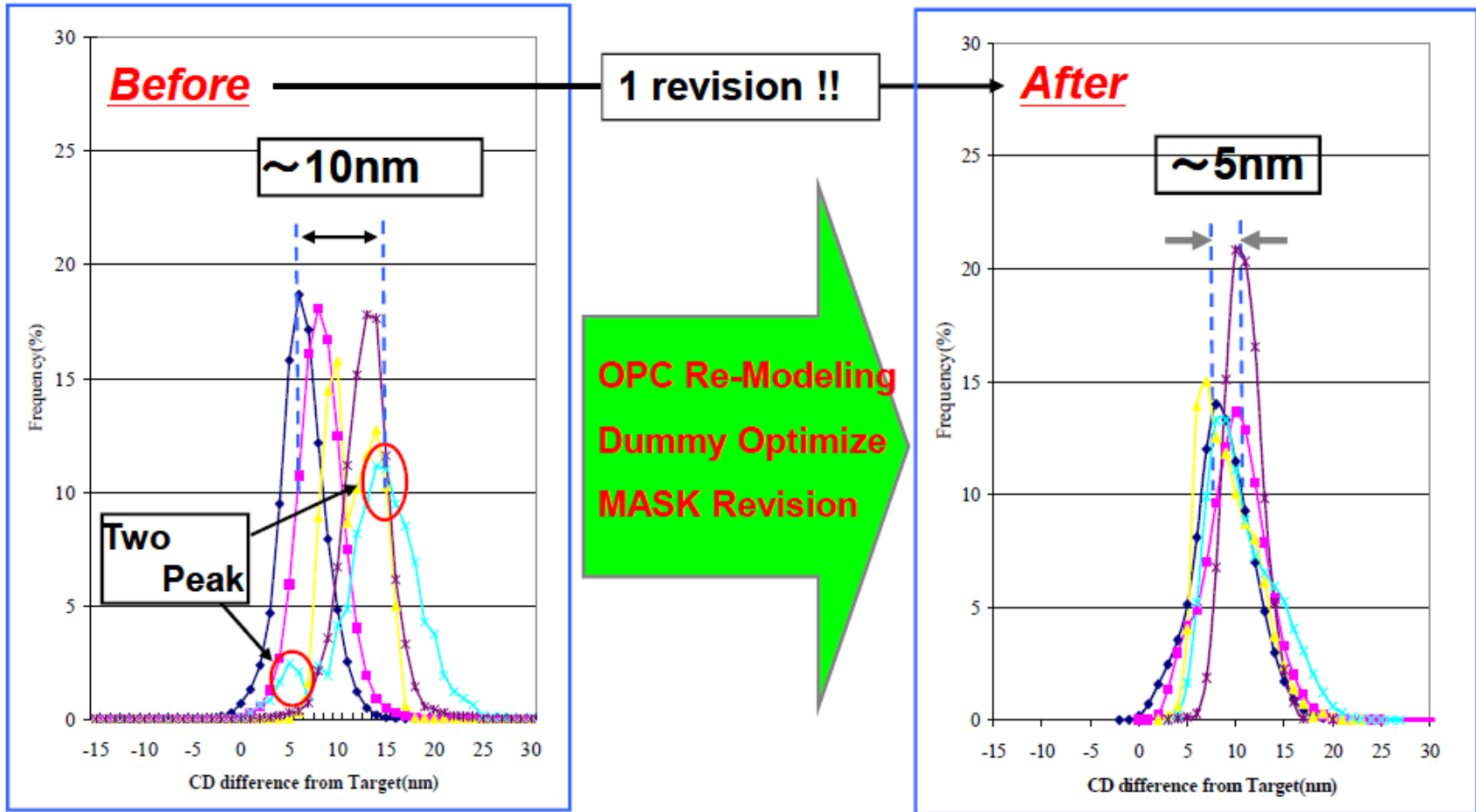
 Mass CD Measurement



Pin-point計測を含め Sampling Plan によって、真の計測平均値あるいはmedian値との乖離が生じる。この乖離をもとにComputational Lithographyのcalibrationを行うriskが存在する。

Contour Metrology

(計測結果事例)



Low Yield / Low Performance

Yield Up / Performance Up

設計上同一寸法であっても、大量のデータを取得することで、OPCのモデルの問題、周辺dummyパターンからの影響の見積もりの問題、マスク精度上の問題も分離して理解され、修正をすることでデバイス特性の安定化につながる。

提供：NanoGeometry Research Inc.

まとめ

- Double Patterningに対応したOverlay計測に関して、高次のoverlay制御を行うためのin-die-markの微細化と計測精度の両立が課題である
- Computational Lithographyのモデルの高精度化のためのcalibrationに必要なFull Chipレベルのcontour計測に関しては、maskおよびウェーハの対応した、高scan rateのSEMが現状availableである

故障解析SWG 2010年度活動状況報告

リーダー
二川 清(大阪大学)

故障解析SWGメンバー(2011/3/4現在)

役 職	氏名	所属	役 職	氏名	所属
リーダー	二川 清	大阪大学	特別委員	小川 真一	産業技術総合研究所
サブリーダー	益子 洋治	大分大学	"	中島 蕃	デバイス・アナリティクス(株)
委員	長谷川 芳樹	富士通セミコンダクター(株)		八坂 行人	エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)
"	朝山 匡一郎	ルネサスエレクトロニクス(株)	"	藤井 利昭	エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)
"	小守 純子	ルネサスエレクトロニクス(株)	"	三井 泰裕	(株)日立ハイテクノロジーズ
"	渡辺 雄一	三洋半導体(株)	"	柿林 博司	(株)日立ハイテクノロジーズ
"	則松 研二	(株)東芝 セミコンダクター社	"	寺田 浩敏	浜松ホトニクス(株)
"	平賀 則秋	ローム(株)	"	須賀 三雄	日本電子(株)
特別委員(大学)	中前 幸治	大阪大学	"	橋本 秀樹	(株)東レリサーチセンター
"	眞田 克	高知工科大学	"	杉江 隆一	(株)東レリサーチセンター
"	上野 和良	芝浦工業大学	合計人数	21	21

故障解析SWGでの討議内容と講師一覧

日時:2010年4月16日(金) 13:30~17:00	日時:2010年10月1日(金)13:30~17:00
1: 田中 弘治 (アストロン)	1: 田中 弘治 (アストロン)
「故障解析標準フォーマット用コンバータソフトについて」	「故障解析標準フォーマット用
2: 眞田 守人 (ルネサスエレクトロニクス)	コンバータソフトについて:現状報告」
「動的解析の解析周波数の向上のための	2: 小川 真一 (産業技術総合研究所)
故障解析容易化設計」	「Heイオン顕微鏡技術:装置概略と評価技術の
3: 三浦 克介 (大阪大学)	現状と今後への期待(その2)」
「電流密度分布シミュレーションを用いた	3: 須賀 三雄 (日本電子)
走査レーザSQUID顕微鏡によるVLSI診断法の検討」	「国際顕微鏡学会報告:
	HIM(ヘリウムイオン顕微鏡)を中心に」
日時:2010年7月9日(金)13:00~17:15	4: 渡辺 雄一 (三洋半導体)
1: 田中 弘治 (アストロン)	「TSC-webでの不良解析ページの進捗状況
「故障解析標準フォーマット用	
コンバータソフトについて:現状報告」	日時:2011年1月14日(金)13:30~17:00
2: 寺田 浩敏 (浜松ホトニクス)	1: 小川 真一 (産業技術総合研究所)
「光を使った最近の高解像度化技術について」	「Heイオン顕微鏡の概要と見学時の注意事項」
3: 小川 真一 (産業技術総合研究所)	2: Heイオン顕微鏡見学(第1班)
「Heイオン顕微鏡技術:	3: Heイオン顕微鏡見学(第2班)
装置概略と評価技術の現状と今後への期待」	4: 多持隆一郎(日立ハイテクノロジーズ)
4: 八坂 行人 (SIINT:エスアイアイ・ナノテクノロジー)	「最新FE-SEMで得られる各種コントラスト」
「SIINTIにおける希ガスイオンを用いた	5: HIMのコントラストに関する総合討議
集束イオンビーム装置開発の現状」	
5: 内田 建 (東京工業大学、ERD-WGリーダー)	
「ERD (Emerging Research Devices、新探求素子)の現状	
と故障解析技術への期待」	

Heイオン顕微鏡(HIM)技術

今年度の活動報告

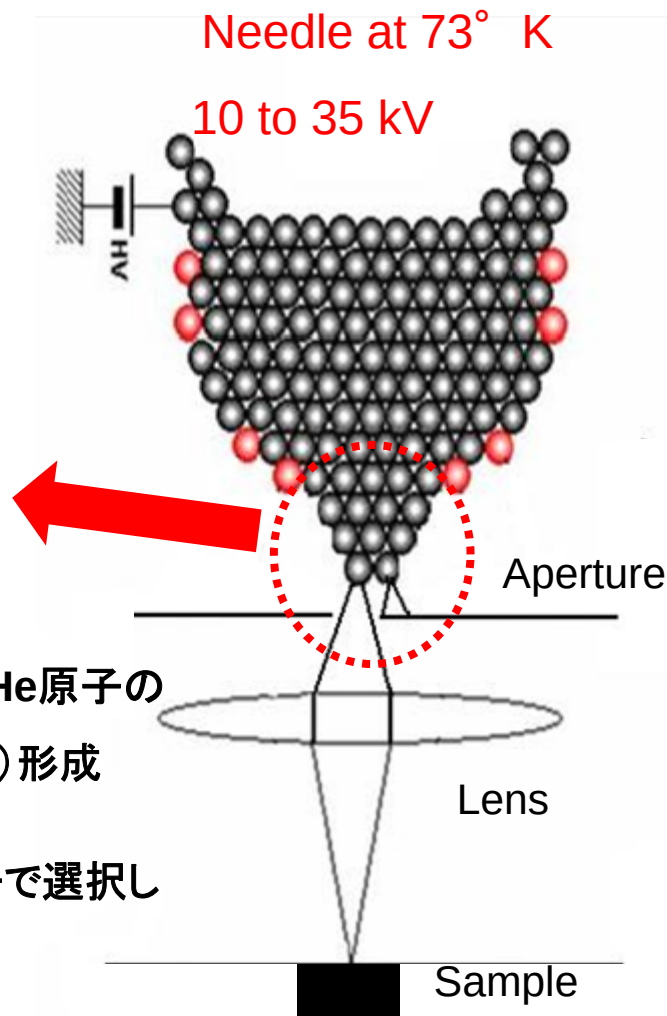
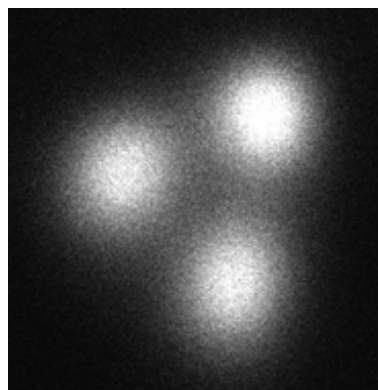
－ 装置概略と評価技術の現状と今後への期待 －

小川真一

産業技術総合研究所 ナノ電子デバイス研究センター

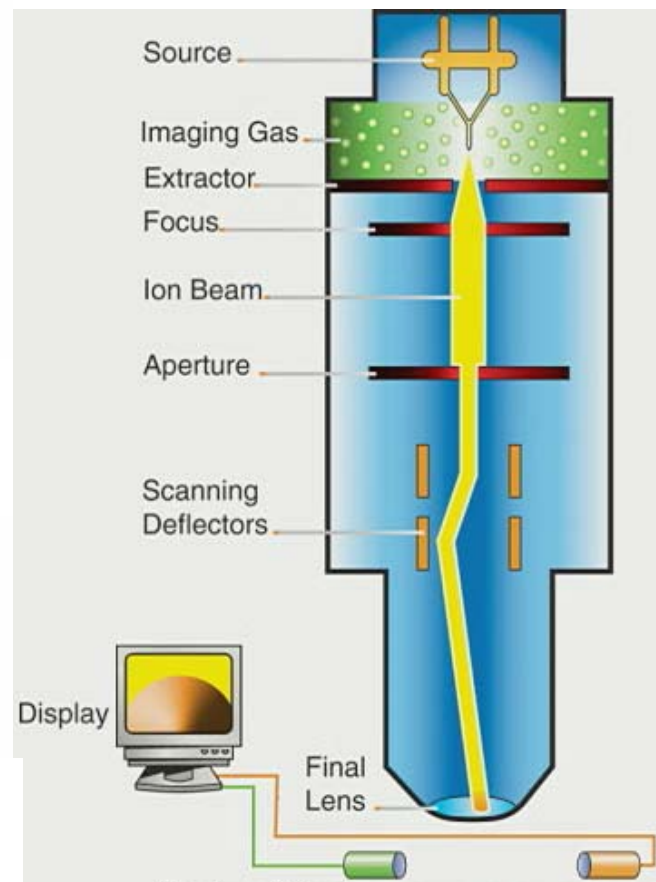
Heイオン顕微鏡の概略

実際のHeイオン像
(3原子)



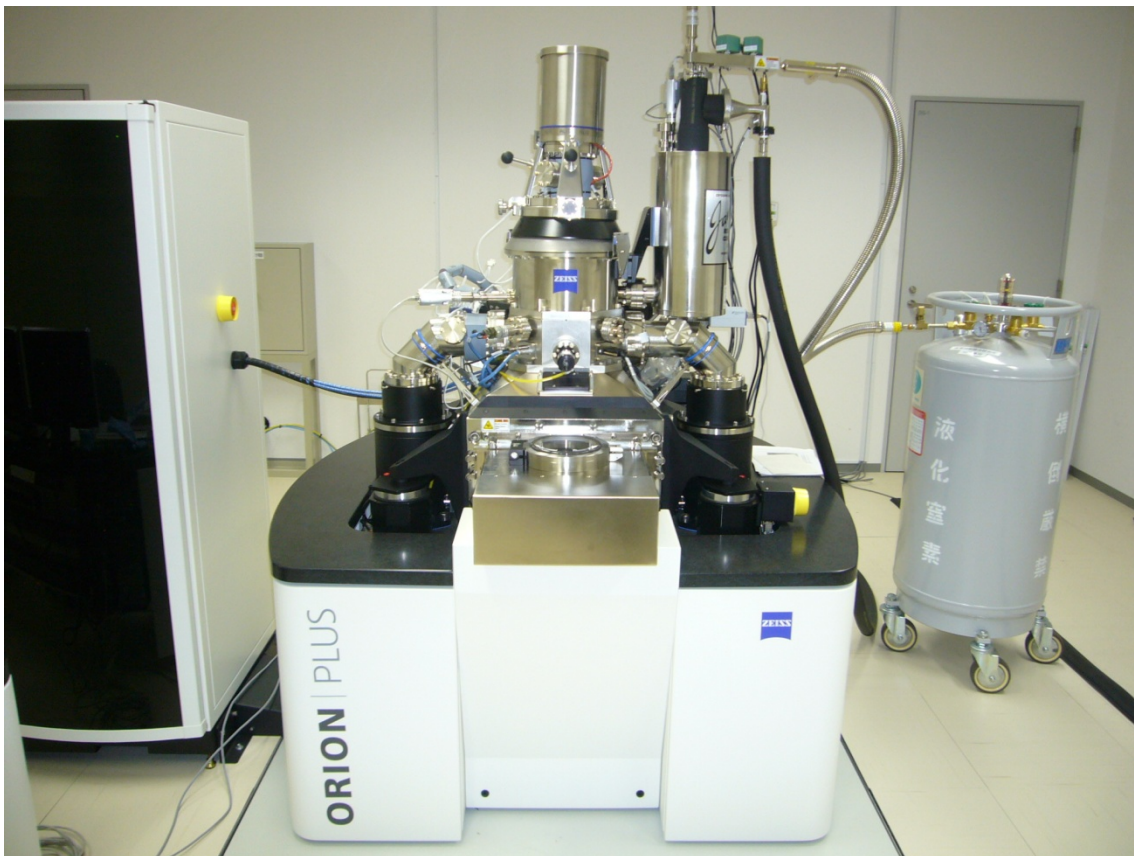
電界引出による針尖端吸着He原子の
“トリマー”(3原子(イオン)対)形成

この内の一つをアパーチャーで選択し
観察用ビームとして使用



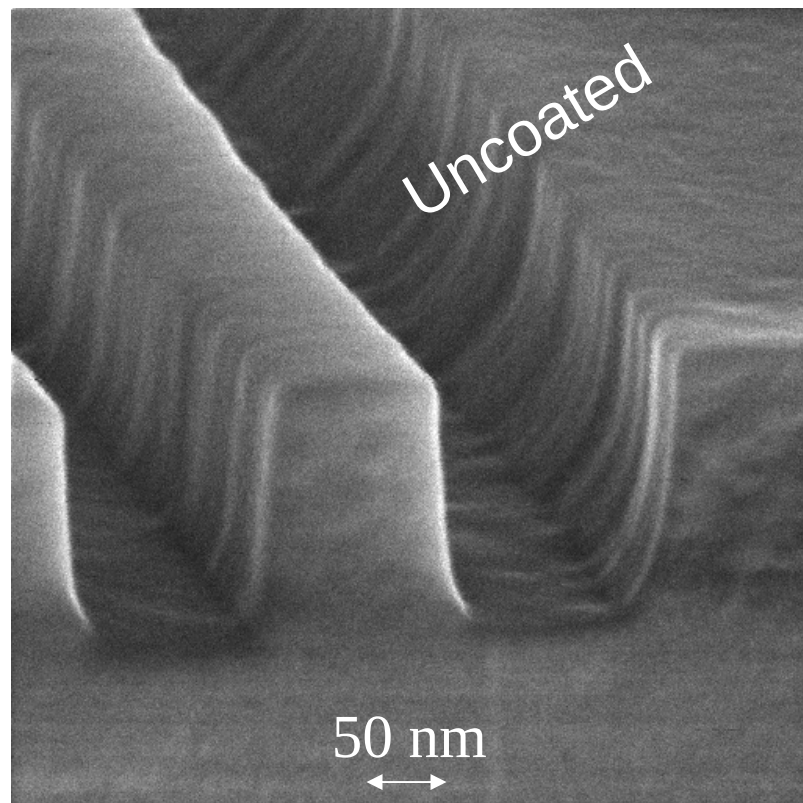
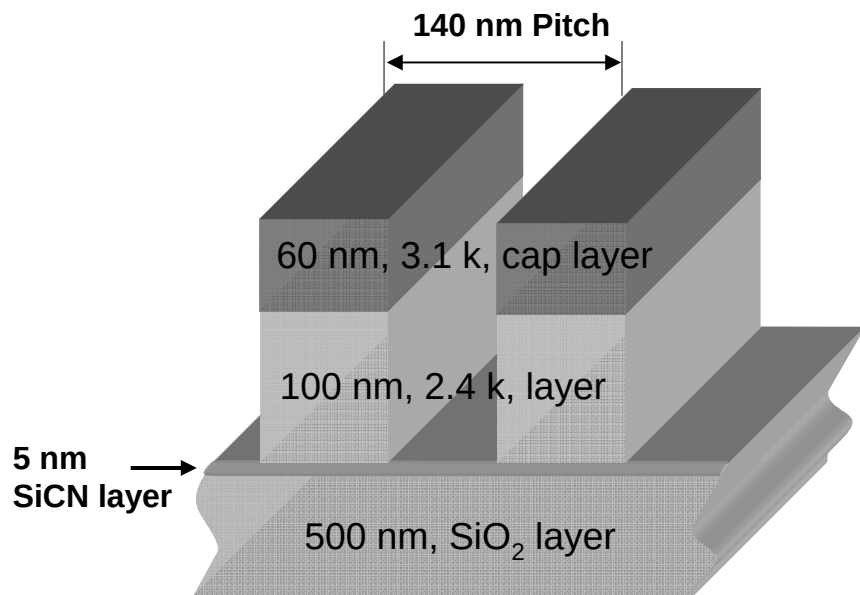
Heイオン顕微鏡(産総研機)の仕様、性能

- HIM SE Mode Resolution
 $\leq 0.35 \text{ nm}$
現状レベル: 0.21~0.39nm
- Beam Landing Energy
10 to 35 keV
- Beam Current
0.1pA - 25pA
→ $10^9 \text{ A/(cm}^2 \text{ sr)}$
- Detectors
 1. Everhart Thornley for Secondary Electrons (SE) imaging
 2. MCP for Rutherford Backscattered Ion imaging (RBI)
 3. RBS
- Sample Surface Neutrality
Maintained by low energy electron
- Gas Injection System
W. TEOS Gases for Deposition
 XeF_2 Gas for Etch



HIM: Helium Ion Microscope
SE: Secondary Electron(2次電子)
MCP: Micro Chanel Plate
RBS: Rutherford Back Scattering

Cu/Low-k配線プロセスでのLow-kパターン観察例



S Ogawa et al, Jpn. J. Appl. Phys., 49 04DB12 (2010)

Image Shows Surface, Sidewall and Floor Detail with <1nm Resolution

- ・低ダメージ（材料の変形はほとんど無し）
- ・深い焦点深度（HIMは基本的に点光源、1:1光学系の長所）

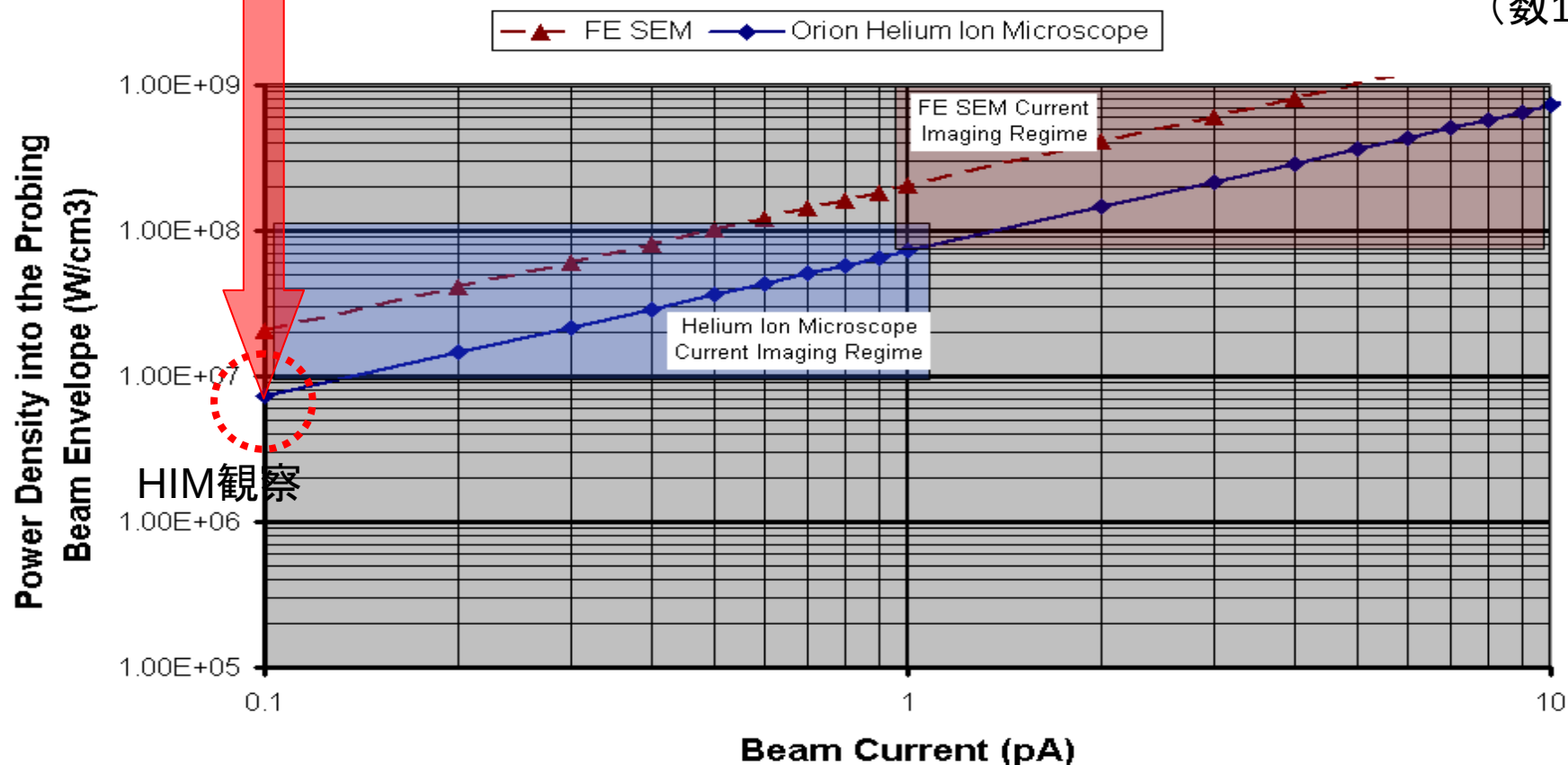
何故、Low-k材料が変形しないか？ HIM観察は熱負荷が少ない！

Power Density in SiO_2 for Ions and Electrons under Typical Imaging Conditions

SEM観察

Beam Probe Power Density vs. Beam Current
For a 1 keV SEM Beam and a 40 keV HIM Beam Into an SiO_2 Sample

(数10pA)



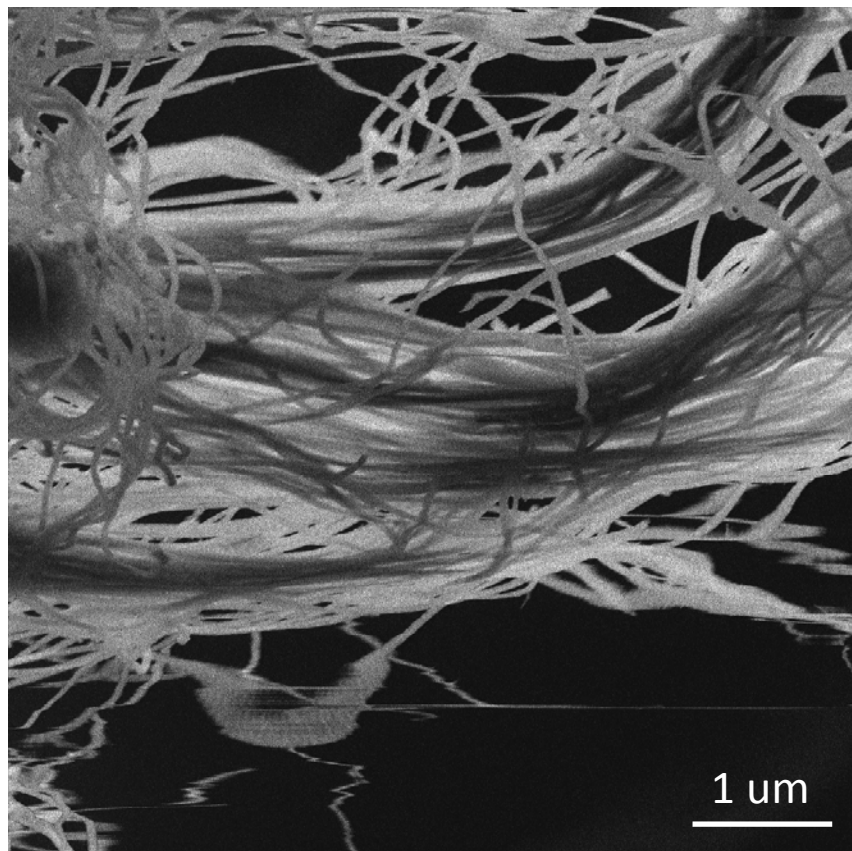
S Ogawa et al, Jpn. J. Appl. Phys., 49 04DB12 (2010)

観察時の照射ビームによる熱負荷：HIM観察はSEMに比べ3桁小！

HIM観察は熱に弱い材料の観察に有利

鼠の肺細胞観察像

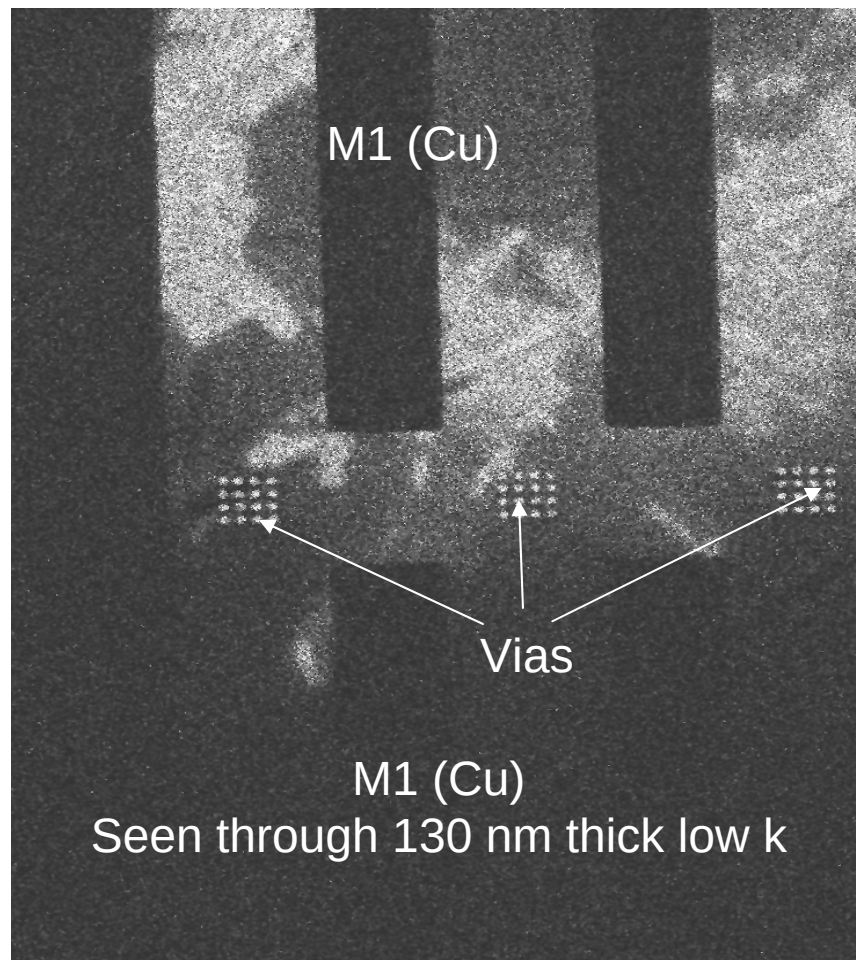
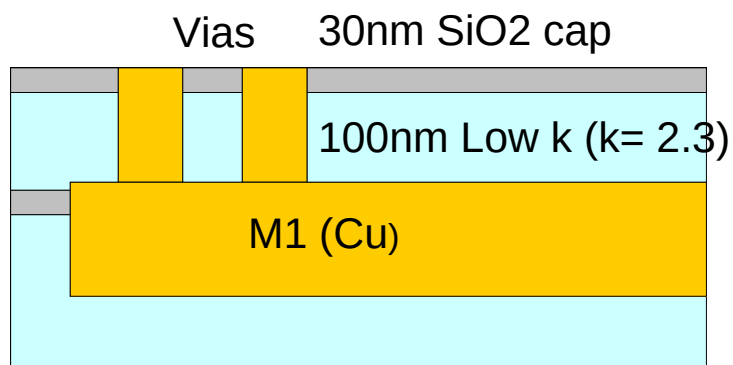
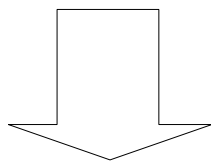
- ・従来のSEM観察などで用いる固定はせず、フリースタANDINGで観察



観察中でもビーム照射による微細繊維状細胞が動かず安定な観察可能

Low-k膜絶縁層下部のCu配線観察例

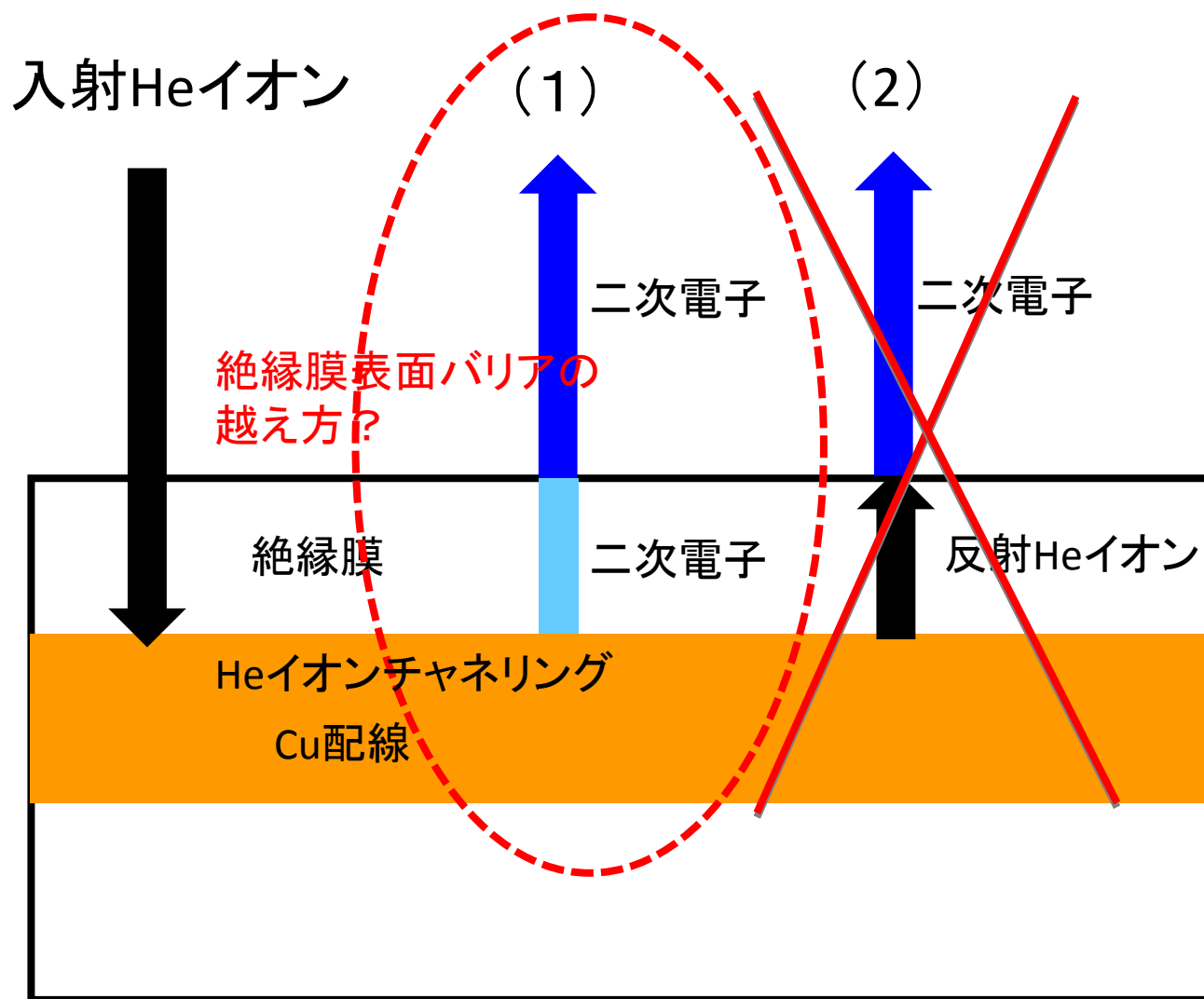
HIM Observation
Direction



S Ogawa et al, Jpn. J. Appl. Phys., 49 04DB12 (2010)

- Low-k膜絶縁層に埋もれたM1(Cu)配線(結晶コントラスト含む)が観察可能

何故、絶縁膜中のCu配線（結晶コントラスト含む）が見えるか？



今後、検証実験および現象の理解が必要

Heイオン顕微鏡観察評価技術の特徴と課題

利点

- ・ 高分解能、チャージアップ小（低電流）
- ・ 表面敏感（導体）で材料コントラスト大
- ・ 低ダメージ（「従来」のSEM、TEMなどに比べて熱負荷小）
生まれたままの姿が見える！（材料、プロセス、デバイス開発で重要）
特にカーボン系、有機、バイオ材料に強み
- ・ 深い焦点深度
- ・ 絶縁膜内部の構造体の二次電子像観察可能
- ・ GISを用いた数nmサイズの薄膜堆積、微細加工可能

課題（HIMの特性をよりユニークに発揮するため）

- ・ Heイオンと試料表面近傍との衝突相互作用、検出像の理解が今後極めて重要
 - Heイオン注入、エッチングなどの現象、メカニズム
 - Heイオン照射による個体表面近傍からの二次電子発生、絶縁膜内での二次電子拡散 / 結像現象、メカニズム