

3D-計測の現状と課題 & 故障解析SWG活動状況報告

3D-計測の現状と課題

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)

2009 ITRS update



		2010	2012	2014	2016	2018
Flash 1/2 pitch (nm)		32	25	20	16	13
MPU Printed Gate Length (nm)		41	31	25	20	16
MPU Physical Gate Lemgtn (nm)		27	22	18	15	13
Wafer Overlay Control (nm) – 20% DRAM		9	7.1	5.7	4.5	3.6
Wafer Overlay Control Double Patterning (nm)		6	5	4	3	3
Lithography Metrology						
Gate	Physical CD Control (3 σ , nm)	2.8	2.3	1.9	1.6	1.3
	Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance					
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3 σ , nm) at P/T = 0.2	0.55	0.46	0.38	0.32	0.27
	Etched Gate Line Width Roughness (3 σ , nm) < 8% of CD	2.12	1.77	1.47	1.23	1.02
Dense Lines	Printed CD Control (3 σ , nm)	3.3	2.6	2.3	1.9	1.5
	Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance					
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3 σ , nm) at P/T = 0.2	0.66	0.52	0.42	0.33	0.26
Double Patterning Overlay Metrology						
	Double Exposure and Etch – Overlay Control (3 σ , nm)	4.6	3.1	2.3	1.8	1.4
	Double Exposure and Etch – Uncertainty (3 σ , nm)	0.91	0.62	0.45	0.35	0.27
Spacer PEE process						
	First pass CD control (after etch) – Process	2.5	2.0	1.6	1.3	1.0
	First pass CD control (after etch) – Uncertainty (3 σ , nm)	0.51	0.40	0.31	0.25	0.20
Front End Processes Metrology						
	High Performance Logic EOT equivalent oxide thickness (3 σ , nm)	0.9	0.7	0.55	0.57	0.54
	Logic Dielectric EOT Uncertainty (3 σ , nm)	0.0036	0.0028	0.0022	0.0023	0.0022
Interconnect Metrology						
	Barrier layer thickness (3 σ , nm)	3.3	2.6	2.1	1.7	1.3
	Void Size for 1% Voiding in Cu Lines	4.5	3.5	2.8	2.2	1.8
	Detection of Killer Pores at (nm) size	4.5	3.5	2.8	2.2	1.8

P/T: Precision to Tolerance ratio

2010年度向けOverlay計測マーク のサイズ要求の提案

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

<i>Year of Production</i>	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f)	32	25	20	15.9	12.6	10.0	8.0	6.3
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(光最小線幅計測)

2009活動概要

ITRSでの活動

1. Stress Table Update
2. Contour Metrology ⇒ Multi-column化
3. 3D要求範囲の拡大
4. Metrology for ERD/ERM (既存のmetrologyとのgap大)

国内活動(X線計測一般のヒアリング)

1. 蛍光X線
2. GI-SAXS (Glazing Incident-Small Angle X-ray Scattering) による構造解析
3. 構造解析の比較

3D計測技術比較

	測定形態	利点	欠点
Scatterometry	非破壊	<ul style="list-style-type: none"> 計測器シンプル 計測時間短い プロセス広範囲に導入 	<ul style="list-style-type: none"> ライブラリー作成時間が長い 繰り返しパターンのみ
GI-SAXS, 透過型SAXS	非破壊	<ul style="list-style-type: none"> 計測器シンプル 計測時間短い 	<ul style="list-style-type: none"> ライブラリー不要? ライブラリー作成時間短い 繰り返しパターンのみ 未商用
TEM-Tomography	破壊	<ul style="list-style-type: none"> 高空間分解能で3Dの可視化可能 	<ul style="list-style-type: none"> 破壊、ライン導入困難 試料回転時のアライメントの影響大 高価

GI-SAXS: Glazing Incident-Small Angle X-ray Scattering

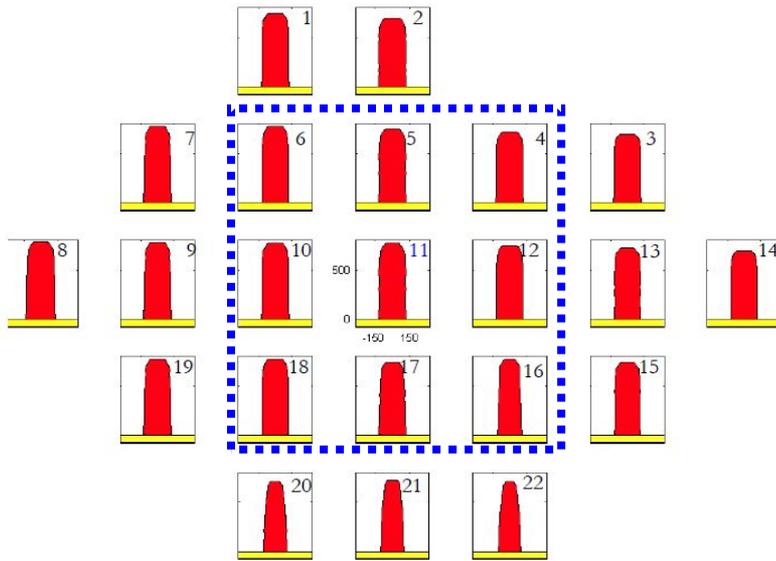
TEM: Transmission Electron Microscopy

OCD (Optical CD Metrology)

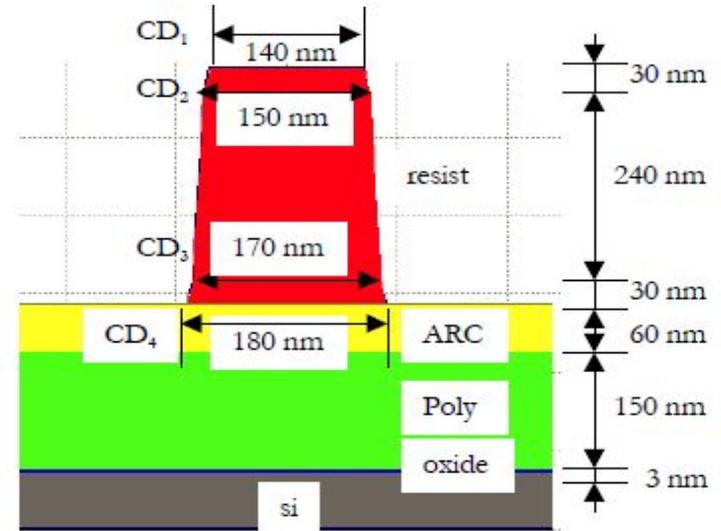
必要性

- 非破壊の3D構造計測
- フォーカス、露光量推定

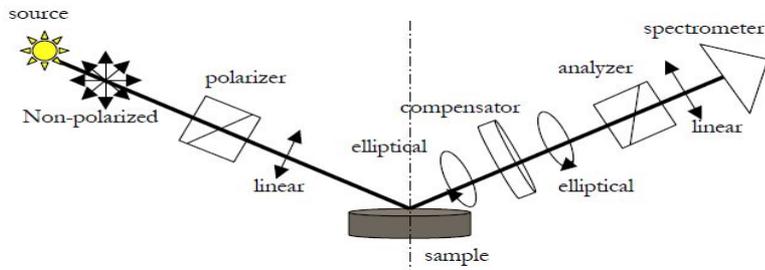
OCDによる形状推定



(a) プロセス上で変動する形状

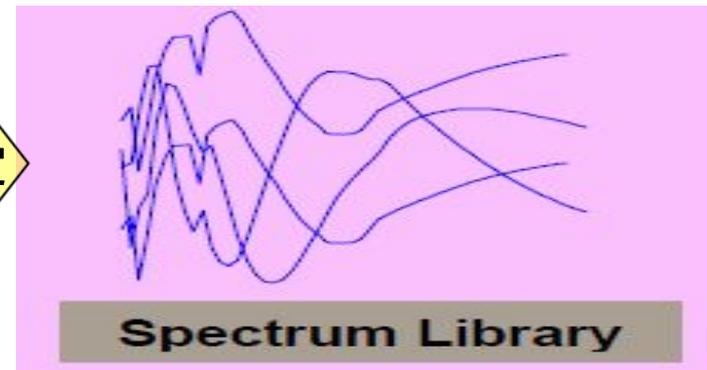


(b) 形状モデルの設定



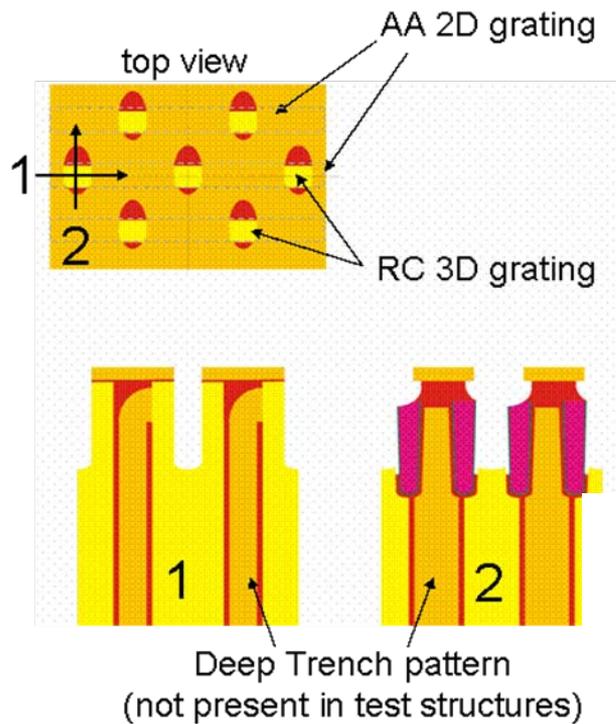
(d) 計測スペクトル

形状推定

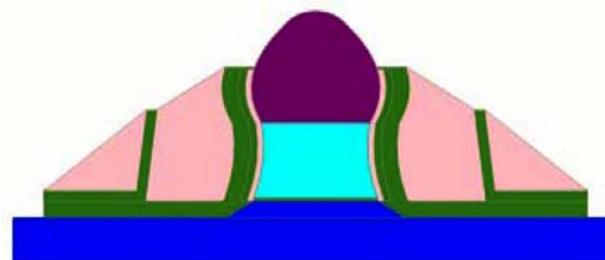


(c) ライブラリー作成

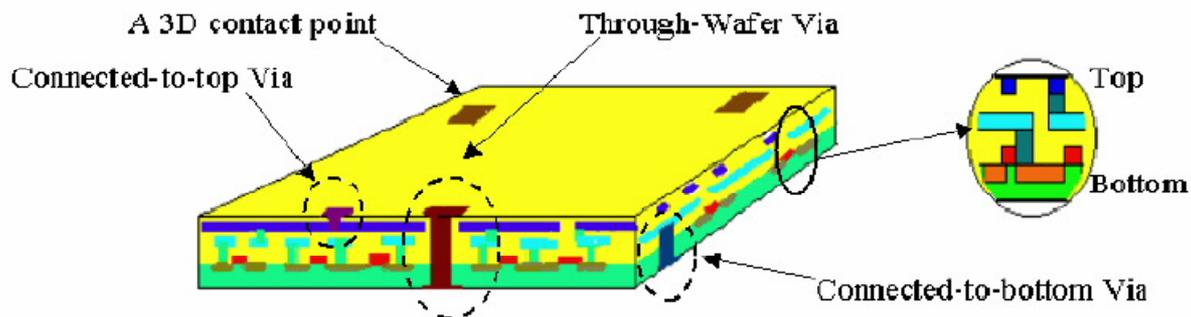
OCDの計測対象要求 (その1)



(a) FEPの構造



(b) 多重スペーサーTr構造

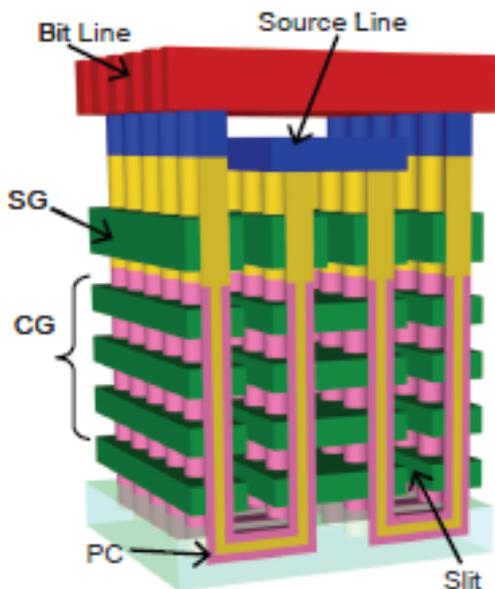


(c) Interconnect構造

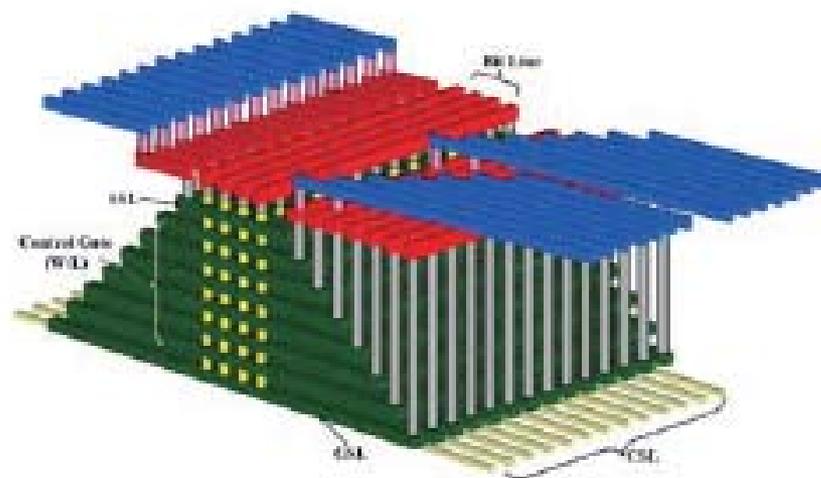
OCDの計測対象要求 (その2)

3D Metrology – Complex structure measurement and inspection are required

e.g. high A/R (Aspect Ratio) holes, film thickness & properties on sidewall



Pipe-shaped BiCS Flash Memory
(R. Katsumata, Toshiba)



TCAT (Terabit Cell Array Transistor)
(J. Jang, Samsung)

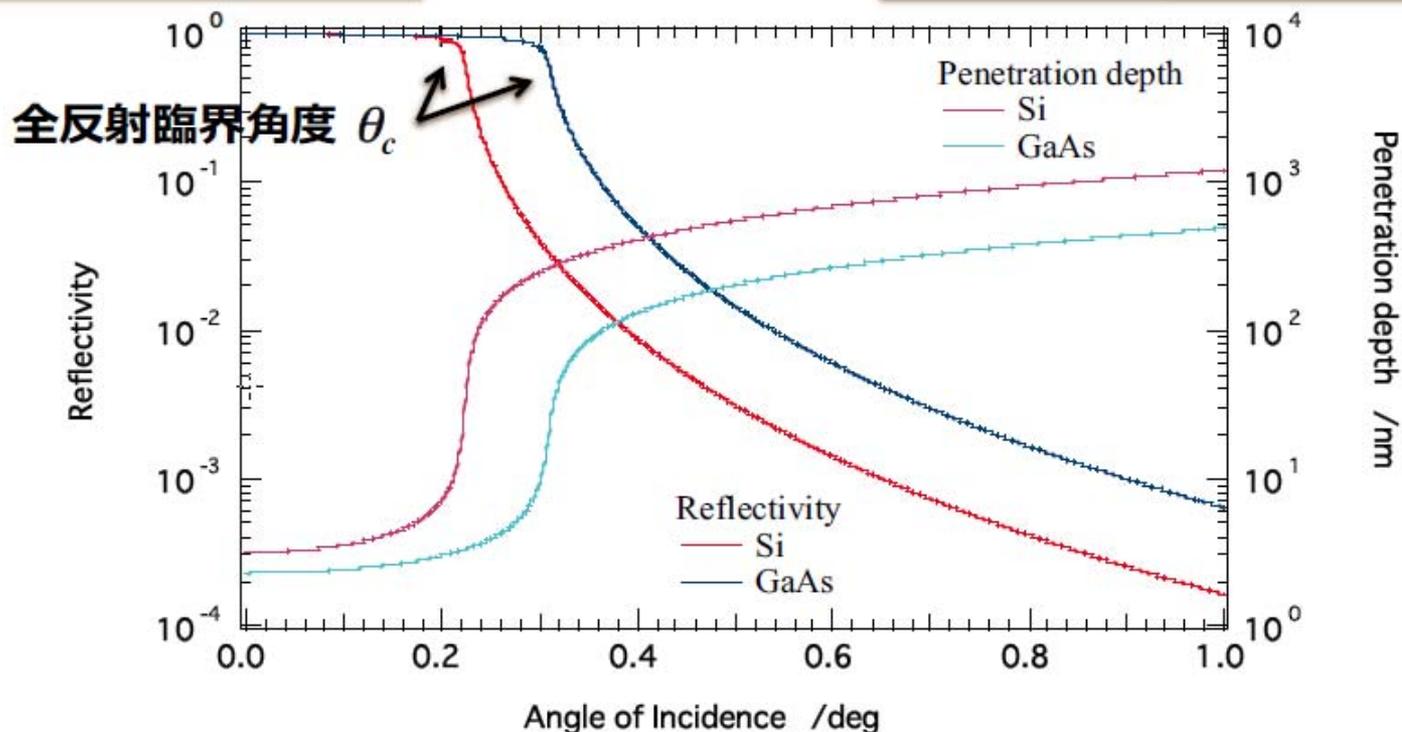
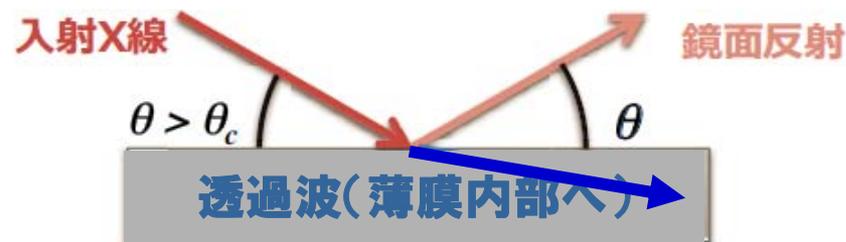
OCDの現状と課題

- 現状は、形状モデルとして、光学定数 (n, k) がfixの条件で、形状パラメータのfloatingを行っているが、実際の n, k を正確に計測することは不可能であるため、 n, k についてもfloatingが必須。
- 今後モデルの柔軟性と計算機能力の向上が重要。

Glazing Incident Small Angle X-ray Scatteringによる形状計測

(繰返し構造なので2次元形状計測)

全反射とX線進入深さ



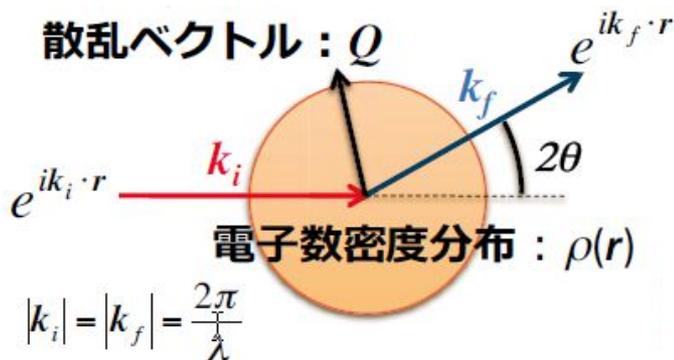
- X線入射角度が全反射臨界角度近傍で，表面の感度が極めて高くなる。

出典:  Rigaku

GI-SAXSによる構造解析

【概要】

1. 多層膜中における平面波(光X線)は、Fresnelの式に基づいて解析的に解く(表現する)ことが出来る。
2. したがって、ある膜中(j番目の膜)の構造体に着目して、入射波($\exp(-k_i \cdot r)$)、反射波($\exp(-k_f \cdot r)$)を考える。この場合、入射波の散乱は、構造体の電子密度関数 $\rho(r)$ を用いて、以下のように表現できる。



$$\begin{aligned} \langle k_i | \rho(r) | k_f \rangle &= \int_{\text{scatter}} e^{-ik_f \cdot r} \rho(r) e^{+ik_i \cdot r} dr = \int_{\text{scatter}} e^{-i(k_f - k_i) \cdot r} \rho(r) dr \\ &= \int_{\text{scatter}} e^{-iQ \cdot r} \rho(r) dr \quad Q: \text{散乱ベクトル} \quad \text{式(1)} \end{aligned}$$

3. 散乱光は、光子エネルギーとして観測されるために、以下の式がその信号(情報量)になる。

$$\frac{d\sigma(Q)}{d\Omega} = \left| \frac{1}{4\pi} \int_{\text{scatter}} e^{-iQ \cdot r} \rho(r) dr \right|^2 \quad \Omega: \text{立体角} \quad \text{式(2)}$$

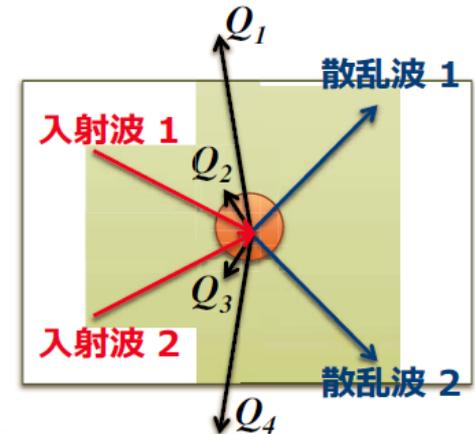
4. この式は $\rho(r)$ のフーリエ変換の二乗(パワー)を示しているが、位相情報が無いためにこの式から逆変換で $\rho(r)$ を求めることはできない。したがって $\rho(r)$ に対して形状関数を定義し、信号に最適な形状関数のパラメータを決定する方法が考えられる。

(続)

- この始状態の入射波と終状態の散乱波を用いて、構造体 $\rho(r)$ の散乱波は以下のように表現される。これは前slideの式(1)に相当。
- この散乱波の二乗が実際に観測される信号となる(前述式(2)相当)。そして $\rho(r)$ を電子密度分布形状パラメータで表現して、信号とのマッチングをとることによって形状を特定するものである。

始状態：入射波 $\psi(\theta, X, Z) = T_1 \left(e^{ik_0\alpha_1 Z} + R_1\varphi_1^2 e^{-ik_0\alpha_1 Z} \right) e^{ik_0 \cdot X}$

終状態：散乱波 $\tilde{\psi}(\tilde{\theta}, X, Z) = \tilde{T}_1^* \left(e^{-ik_0\tilde{\alpha}_1 Z} + \tilde{R}_1^* \tilde{\varphi}_1^{*2} e^{ik_0\tilde{\alpha}_1 Z} \right) e^{i\tilde{k}_0 \cdot X}$



$$\langle \tilde{\psi}(\tilde{\theta}, X, Z) | \rho(r) | \psi(\theta, X, Z) \rangle = \int_{Scatter} \rho(r) \tilde{\psi}^* \psi dr$$

$$= \int_{Scatter} \rho(r) \tilde{T}_1 \left(e^{ik_0\tilde{\alpha}_1 Z} + \tilde{R}_1^* \tilde{\varphi}_1^{*2} e^{-ik_0\tilde{\alpha}_1 Z} \right) e^{-i\tilde{k}_0 \cdot X} T_1 \left(e^{ik_0\alpha_1 Z} + R_1\varphi_1^2 e^{-ik_0\alpha_1 Z} \right) e^{ik_0 \cdot X} dr$$

$$= T_1 \tilde{T}_1 \left[e^{-ik_0(-\tilde{\alpha}_1 - \alpha_1)Z} \int_{Scatter} \rho(r) e^{-i((\tilde{k}_0 - k_0) \cdot x + k_0(-\tilde{\alpha}_1 - \alpha_1)z)} dr \right] \quad \text{入射波 1} \rightarrow \text{散乱波 1 の形状因子}$$

$$+ R_1\varphi_1^2 e^{-ik_0(-\tilde{\alpha}_1 + \alpha_1)Z} \int_{Scatter} \rho(r) e^{-i((\tilde{k}_0 - k_0) \cdot x + k_0(-\tilde{\alpha}_1 + \alpha_1)z)} dr \quad \text{入射波 2} \rightarrow \text{散乱波 1 の形状因子}$$

$$+ \tilde{R}_1^* \tilde{\varphi}_1^{*2} e^{-ik_0(\tilde{\alpha}_1 - \alpha_1)Z} \int_{Scatter} \rho(r) e^{-i((\tilde{k}_0 - k_0) \cdot x + k_0(\tilde{\alpha}_1 - \alpha_1)z)} dr \quad \text{入射波 1} \rightarrow \text{散乱波 2 の形状因子}$$

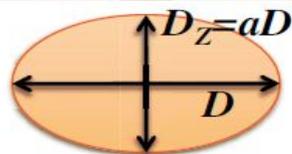
$$\div + R_1\varphi_1^2 \tilde{R}_1^* \tilde{\varphi}_1^{*2} e^{-ik_0(\tilde{\alpha}_1 + \alpha_1)Z} \int_{Scatter} \rho(r) e^{-i((\tilde{k}_0 - k_0) \cdot x + k_0(\tilde{\alpha}_1 + \alpha_1)z)} dr \quad \text{入射波 2} \rightarrow \text{散乱波 2 の形状因子}$$

式(3)

出典: Rigaku

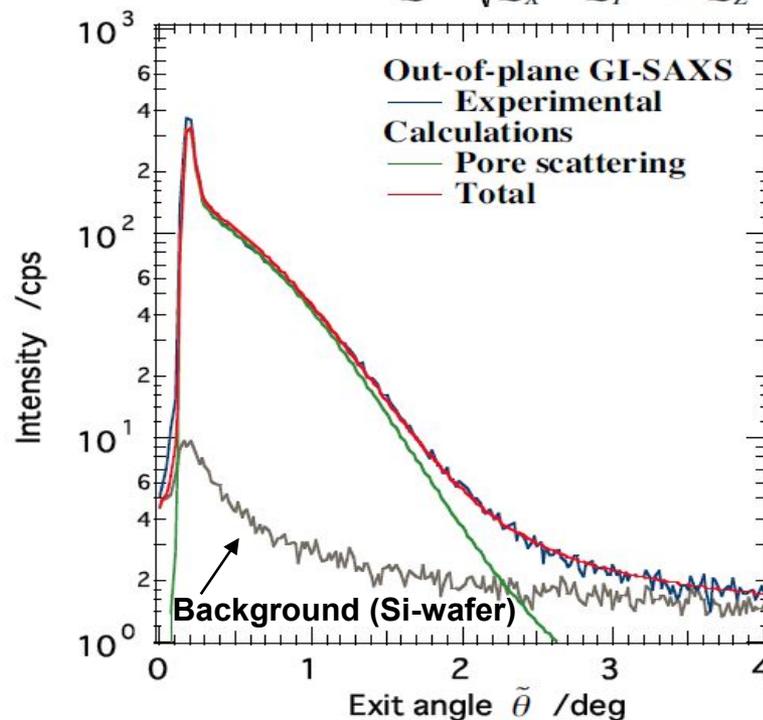
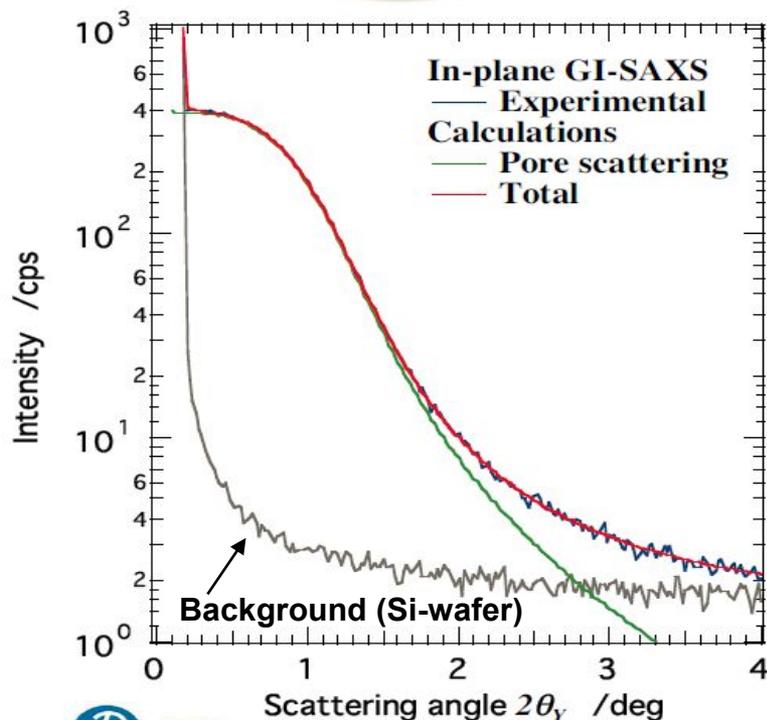
(続) 評価事例: ポーラスLow-k膜の空孔サイズ

GI-SAXS解析 (回転楕円体; ガンマ分布関数) With Innovation



$$F(Q; D, a) = \frac{4\pi a}{Q^3} \left(\sin \frac{Q'D}{2} - \frac{Q'D}{2} \cos \frac{Q'D}{2} \right)$$

$$Q' = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2 + a^2 Q_z^2}$$



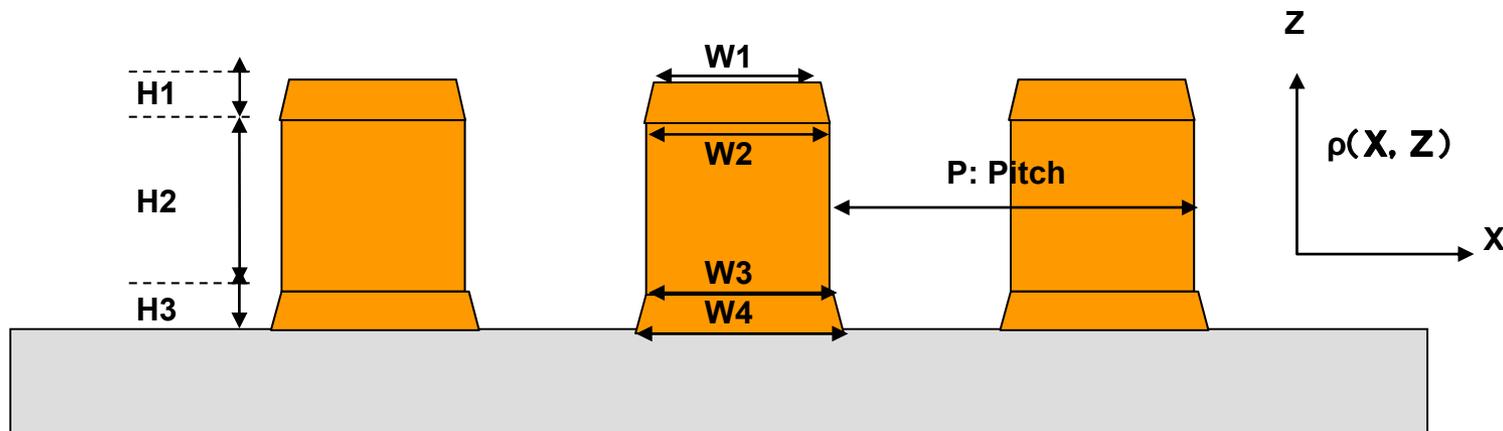
2009/10/15 JEITA GI-SAXS講演会

36

10. 散乱体の形状として楕円体およびガンマ分布関数を用いて、シミュレーションと、実験結果が一致する計上パラメータD、a(楕円率)、及びサイズDの分布の標準偏差 σ_D を決定することが出来る。

(続)

14. 本技術をレジスト形状計測に応用する場合、10項の式を、3項の式(2)に則り二乗して散乱光強度とする。
15. リソグラフィー後のレジストパターンの構造解析に関しては、電子密度関数 $\rho(r)$ を下図の形状パラメータに対応して定義すれば良い。本形状の定義方法は、Scatterometryと同様である。



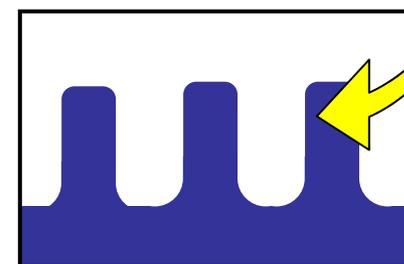
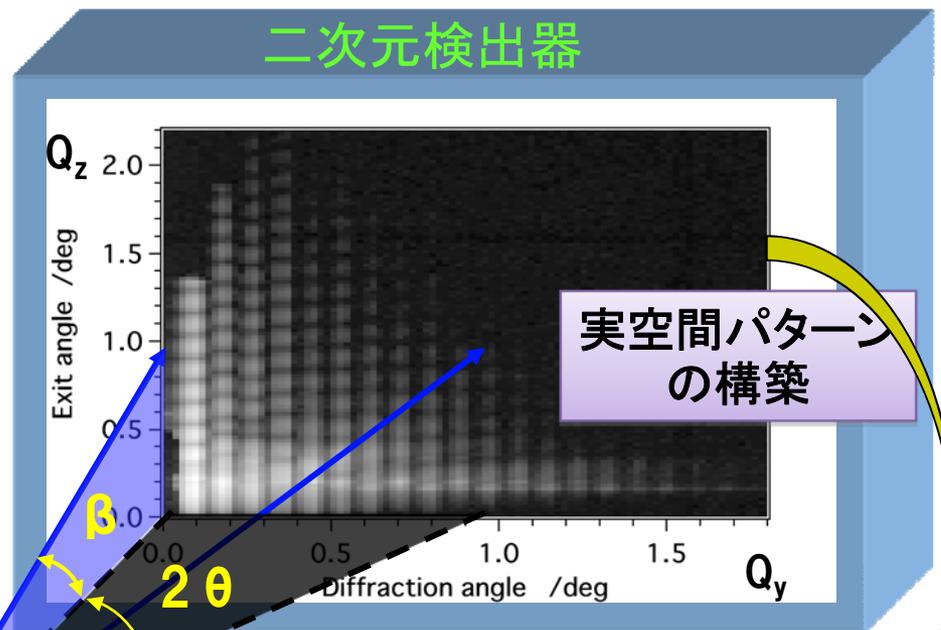
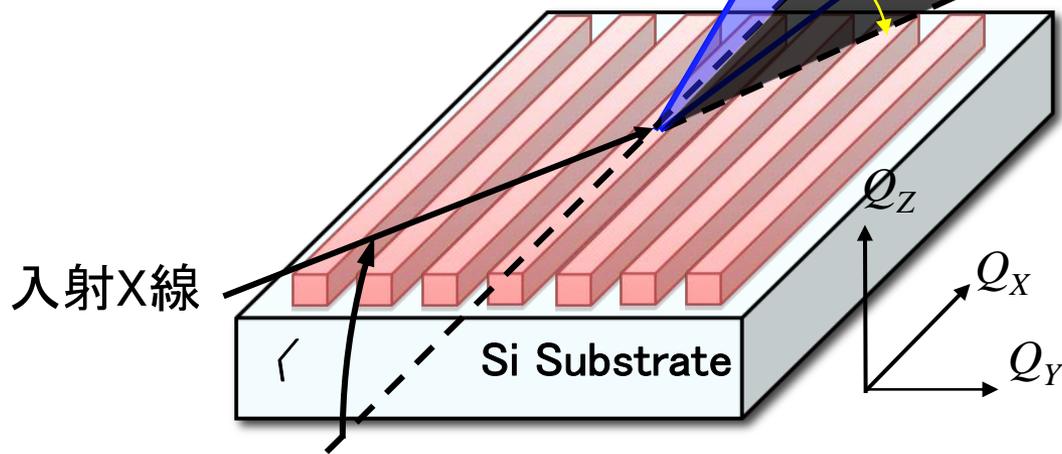
16. レジスト形状について得られるGI-SAXSのin planeおよびout of planeの2軸の散乱強度分布と、事前にシミュレーションの形状パラメータをfloatingさせた際のスペクトルのライブラリーと対比することにより、レジスト形状パラメータ、すなわちレジスト形状を決定する。

GI-SAXS の測定

- ・ 入射したX線は、表面の構造により、さまざまな角度に散乱される。
- ・ 散乱されたX線は干渉し、2次元の回折プロファイルが形成される。

2θ : Diffraction angle

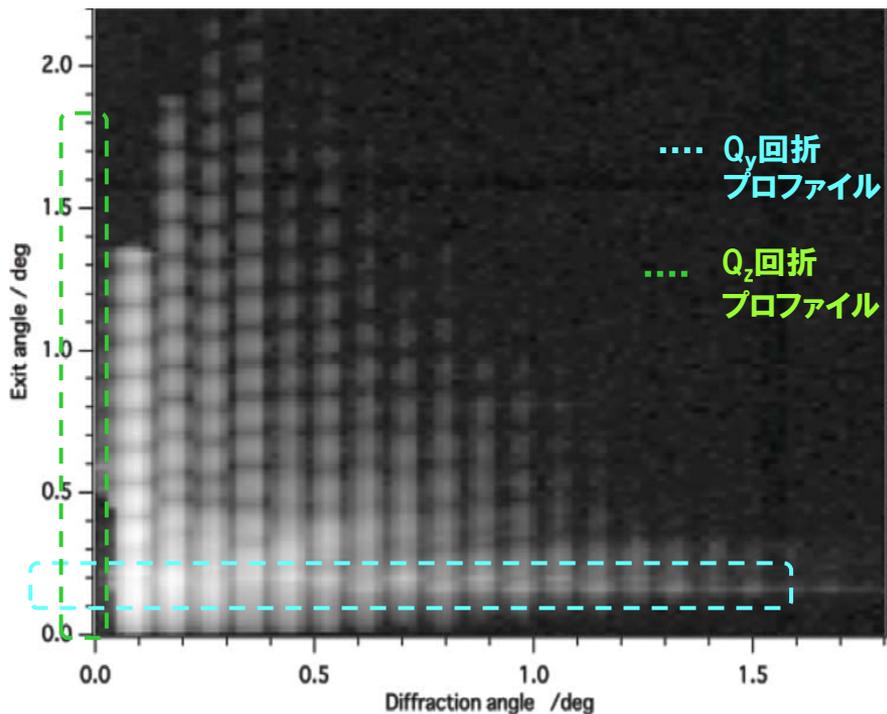
β : exit angle



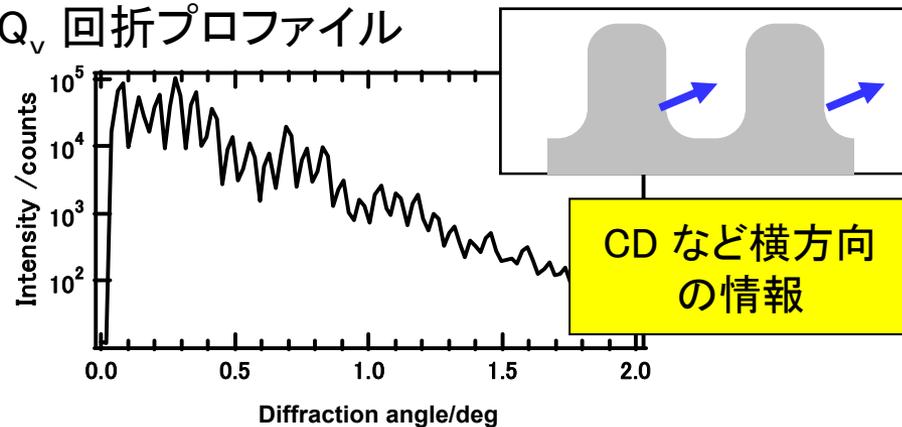
取得した2次元回折プロファイルを解析して、パターンの断面形状を求める。

出典：東芝

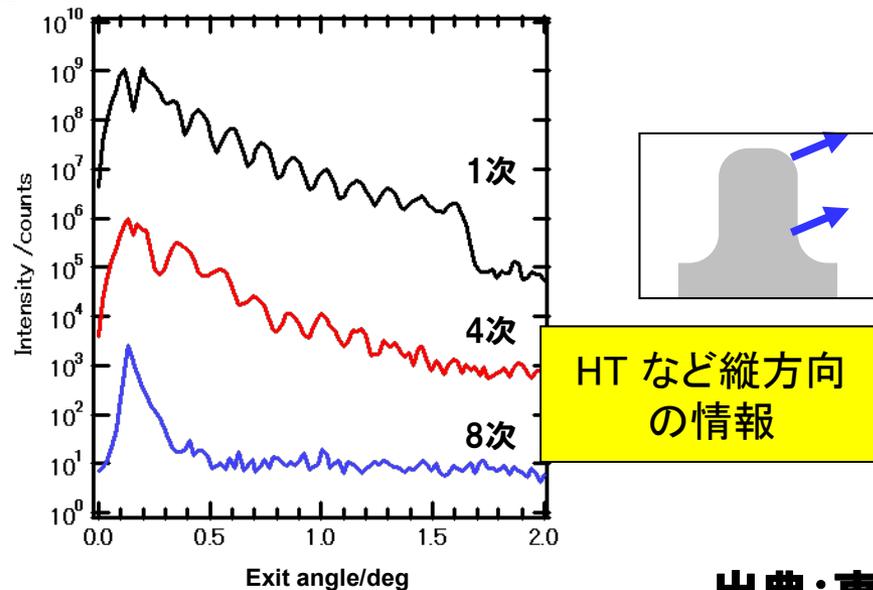
X線回折プロファイル



Q_y 回折プロファイル



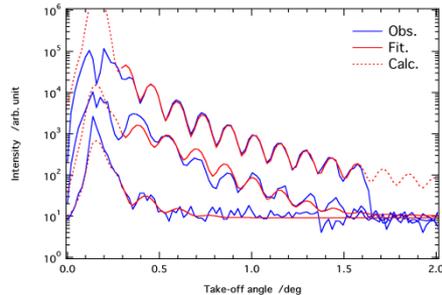
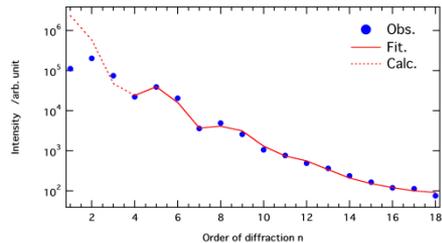
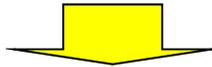
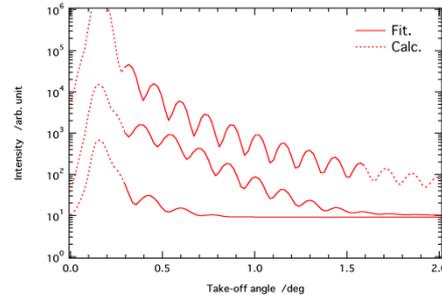
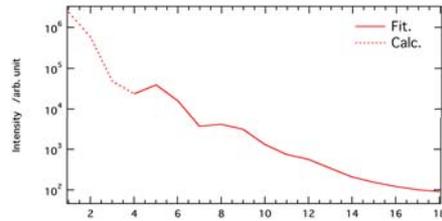
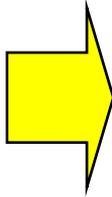
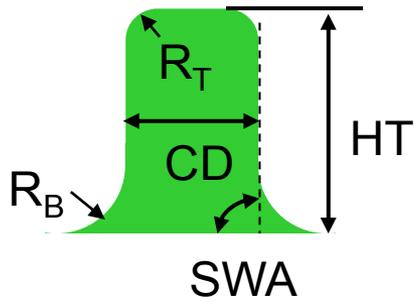
Q_z 回折プロファイル



出典: 東芝

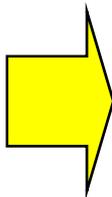
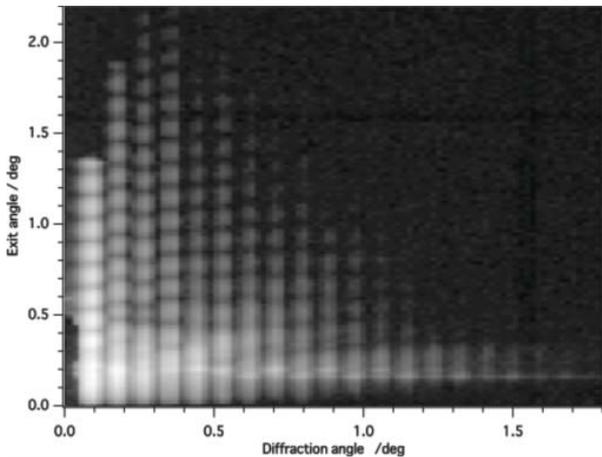
解析方法

解析モデル設定

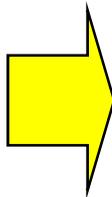
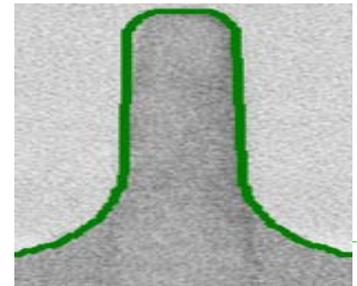


Sim.プロフィール算出

2次元回折プロフィール取得



実験値とつき合せ (フィッティング)



フィッティング誤差が最小となる値を計測値として採用

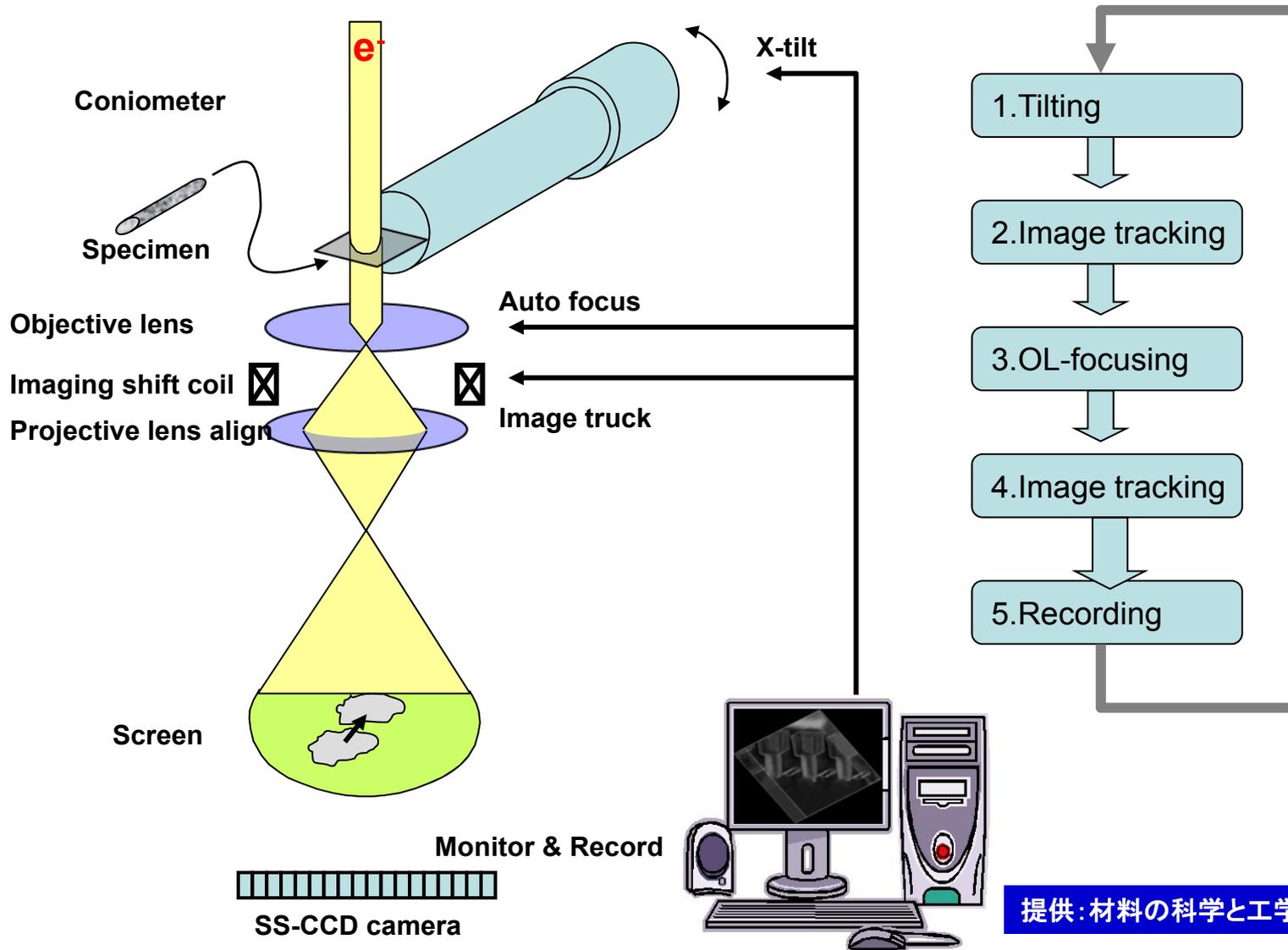
まとめ

1. この理論が適用できる範囲は表面からの深さが100nm程度。
2. 電子密度の差が小さい物質は区別できない。光のscatterometryとの棲み分け必要(あるいは補完が可能)
3. レジストや、エッチング後の表面構造体への適用は可能。
4. 構造体の大きさ等の分布についても分布の関数(ガンマ分布等)を定義すれば、形状パラメータ同様に求めることができる。

TEM + Tomographyによる3Dの 再現 (破壊検査)

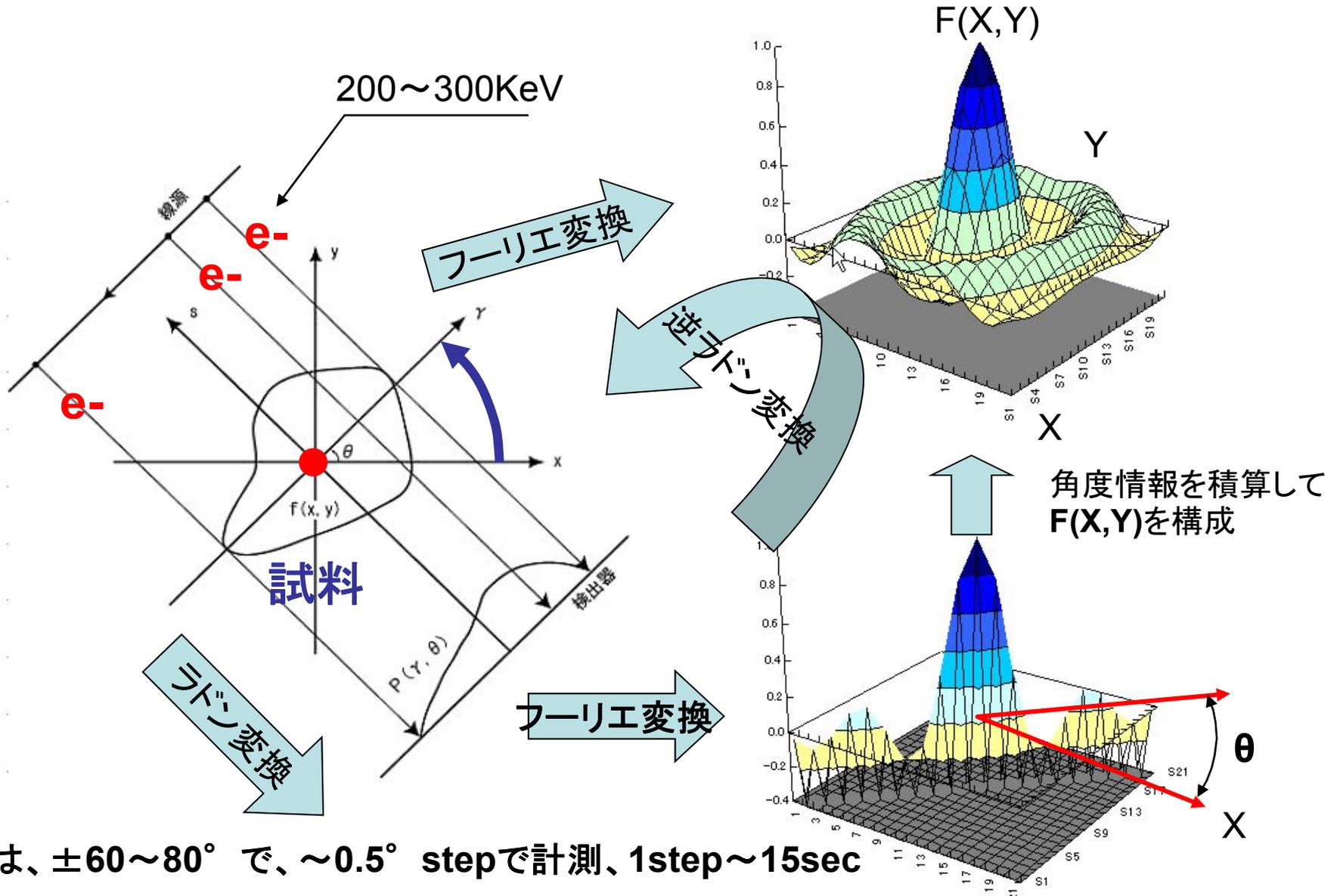
- ・ TEMで困難であった任意の切断面の再現
- ・ インライン計測によるプロセス診断の可能性

TEM 画像の記録



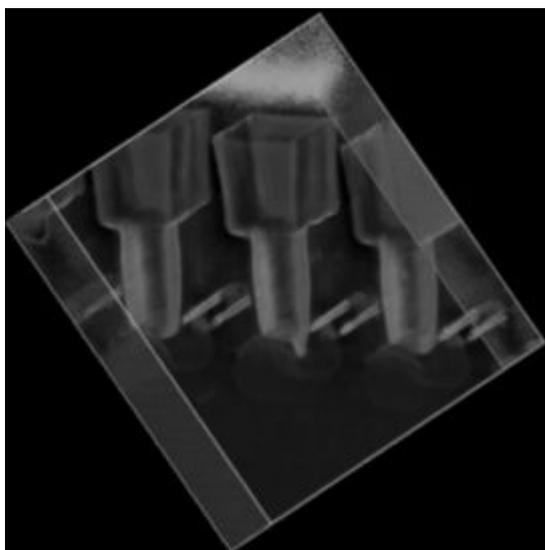
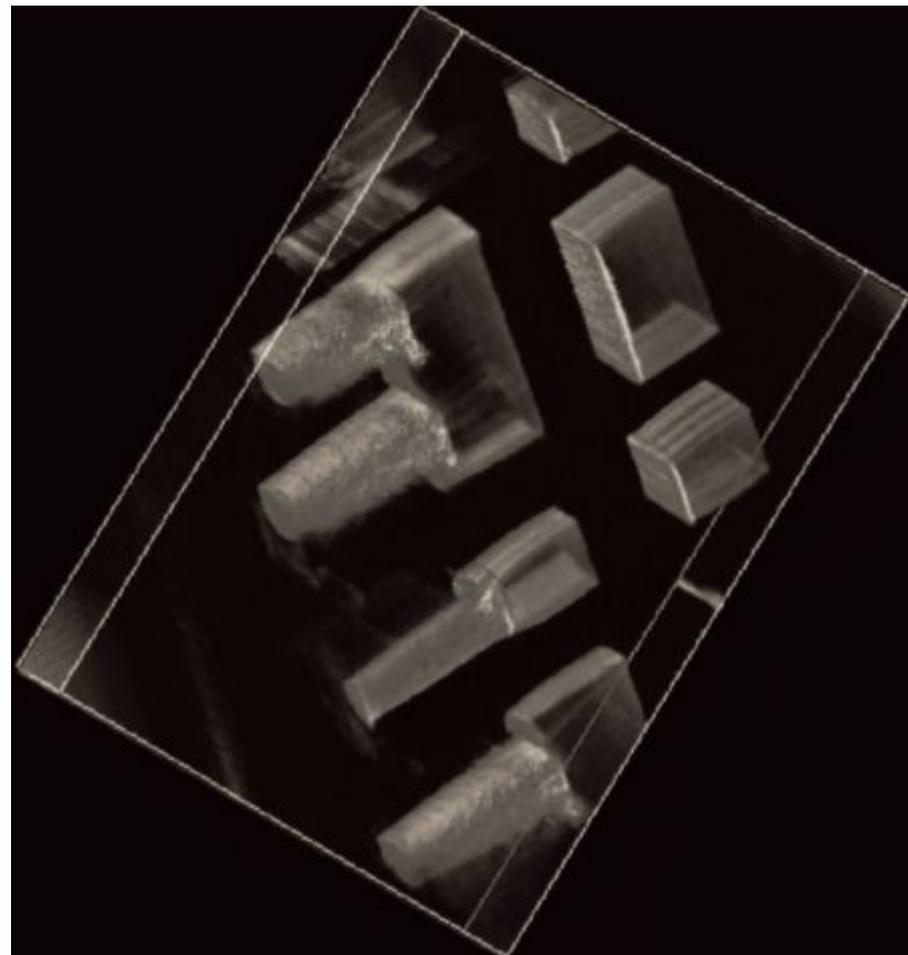
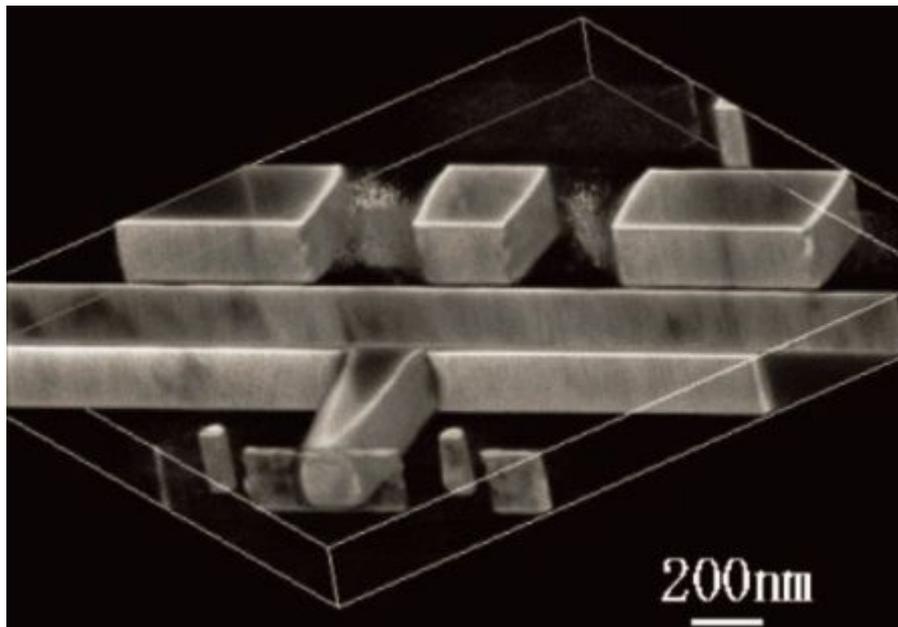
提供: 材料の科学と工学2006No5

電子線トモグラフィの原理



θ は、 $\pm 60 \sim 80^\circ$ で、 $\sim 0.5^\circ$ stepで計測、1step ~ 15 sec

TEM + TomographyのCu配線再現像



提供: 東レリサーチセンター

電子線トモグラフィの課題

1. 3D構造を正確に再現するには、試料の回転に伴い、観察試料面の位置の捕捉および補正が必要。これを自動で正確に行えるソフトウェアの開発が重要。
2. 試料作成プロセス(マイクロサンプリング技術)の簡便化(FIB(Focused Ion Beam)法, CP(Cross-section Polisher)法の 使用)とインライン適用技術の確立
3. 画像再現のデータ変換時間が数分であるのに対して、計測時間が一角度毎に15 sec程度かかるため輝度の向上や、シンチレータの高感度化が必要。

まとめ(3D-計測の現状と課題)

- ・ 非破壊の複雑な3D計測要求に対して対応できる計測手法が現状無い。
- ・ OCD (Scatterometry)は、多数の形状パラメータにおいても短時間にライブラリー作成ができることが今後の課題。同時に屈折率の正確な計測も必要。
- ・ GI-SAXSは、OCDに比べモデルが単純なためライブラリー作成時間が短時間化される可能性がある。一方深さ方向に制約がある。
- ・ TEM+Tomographyは、破壊ではあるが、試料作成時間や、回転軸補正の高精度化で、インライン計測に近い運用ができる可能性があるのでは？

故障解析SWG活動状況報告

二川 清 (大阪大学)

リーダー	二川 清	大阪大学
サブリーダー	益子 洋治	大分大学
委員	長谷川 芳樹	富士通マイクロエレクトロニクス(株)
〃	朝山 匡一郎	(株)ルネサステクノロジ
〃	小守 純子	(株)ルネサステクノロジ
〃	渡辺 雄一	三洋半導体(株)
〃	池田 洋直	セイコーエプソン(株)
〃	則松 研二	(株)東芝 セミコンダクター社
〃	平賀 則秋	ローム(株)
コンソーシアム	小川 真一	Selete
特別委員(大学)	中前 幸治	大阪大学
〃	真田 克	高知工科大学
〃	上野 和良	芝浦工業大学
特別委員	中島 蕃	デバイス・アナリシス(株)
〃	藤井 利昭	エアアイ・ナテクノロジー(株)
〃	三井 泰裕	(株)日立ハイテクノロジーズ
〃	柿林博司	(株)日立ハイテクノロジーズ
〃	寺田 浩敏	浜松ホトニクス(株)
〃	須賀 三雄	日本電子(株)
〃	橋本 秀樹	(株)東レリサーチセンター

活動内容

(ヒアリングにおける情報の提供・議論)

第35回:特集1:ドーパント/キャリア分析(その2) 2009年4月17日(金) 13:30~18:00	
1: 朝山匡一郎 (ルネサステクノロジ)	「収差補正透過電子顕微鏡法 (STEM)」
2: 国宗依信 (NECエレクトロニクス)	「電子線ホログラフィー」
3: 大久保忠勝 (物質・材料研究機構)	「3次元アトムプローブ (3D-AP)」
4: 福留秀暢 (富士通研究所)	「走査型トンネル顕微鏡法 (STM)」
5: 張 利 (東芝)	「走査型拡がり抵抗顕微鏡法 (SSRM)」
6: 本田 耕一郎 (富士通研究所)	「走査型非線形誘電率顕微鏡法 (SNDM):要約」
第36回:特集:3次元解析の現状と課題 2009年6月19日(金) 13:30~17:00	
1: 内田 博 (東芝アナリティクス)	「市販型3次元レーザアトムプローブと原子レベル解析の紹介」
2: 井上耕治 (京都大学)	「3次元アトムプローブによるMOSFET中のドーパント分布解析」
3: 工藤 修一 (ルネサステクノロジ)	「電子線トモグラフィーを用いた半導体デバイスの故障解析技術」
第37回:特集:3次元解析の現状と課題(その2) 2009年8月28日(金) 13:30~17:00	
1: 渡辺 雄一 (三洋半導体)	「三洋半導体における3次元解析の現状と課題(仮題)」
2: 藤井 利昭 (エスアイ・ナテクノロジー)	「FIB/SEM複合機を用いた連続断面観察による3次元像構築の現状と仮題(仮題)」
3: 柿林 博司 (日立ハイテクノロジーズ)	「レプリカ法を用いた3次元電顕観察によるゲートエッジラフネスの3次元測長」
第38回:特集:パワーデバイスとセキュリティ 2009年10月16日(金) 13:30~17:00	
1: 大井 明彦 (富士電機デバイステクノロジー)	「パワーデバイスの故障解析技術(仮題)」
2: 池田 洋直 (セイコーエプソン)	「高耐圧デバイスでの微少リーク不良解析事例」
3: 中島 蕃 (デバイス・アナリティクス(株))	「セキュリティ評価技術と故障解析技術との関係」
第39回:2010年1月29日(金) 13:30~17:00(会議)	
1: 田中 弘治 (アストロン)	「故障解析標準フォーマットの仕様について(仮題)」
2: 桑島 敦 (富士通マイクロエレクトロニクス)	「微小静電界検出プローブによる故障解析手法」
特集:アナログデバイスの故障解析	
3: 渡辺 雄一 (三洋半導体)	「弊社における、アナログ製品の不良解析事例」
4: 久慈 憲夫 (八戸工業高等専門学校)	「アナログ関係の故障診断」

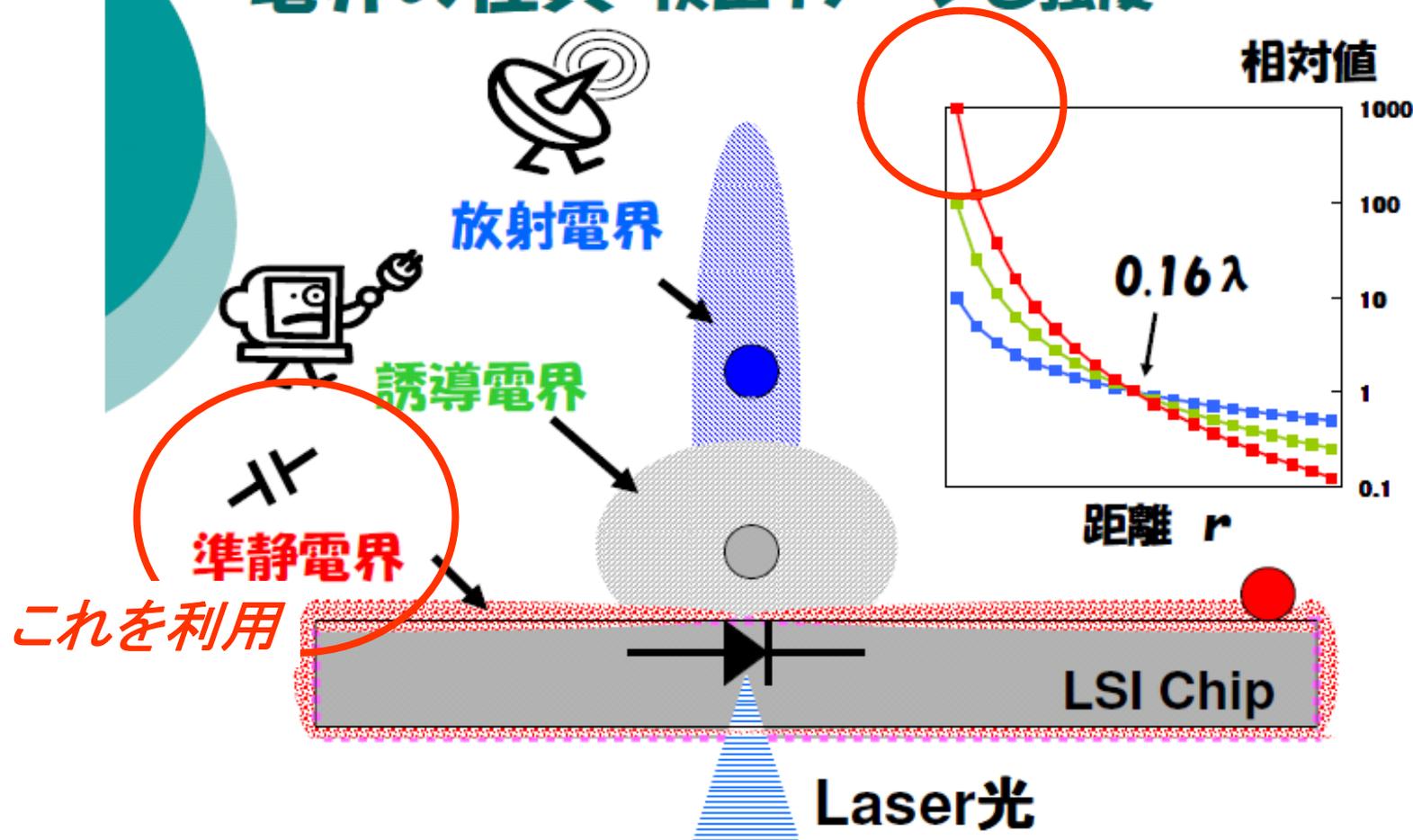
トピックス

（非接触・無バイアス・非破壊の解析法）

従来の提案	技術的特徴	長所	短所
走査レーザSQUID顕微鏡 L-SQUID: Laser-Superconducting QUantum Interference Device (NECEL)	レーザ励起磁場をSQUID磁束計で検出	配線系に適用可能 断線個所の検出可能	閉回路にのみ適用可能
レーザテラヘルツ放射顕微鏡 LTEM: Laser Terahertz Emission Microscope (阪大・理研・NECEL)	フェムト秒レーザ励起THz電磁波を専用アンテナで検出	配線系に適用可能 非閉回路でも適用可能	断線個所の検出困難
光散乱法/フォトルミネッセンス法 (富士通)	レーザ照射による散乱光やフォトルミネッセンス光を検出	配線工程前でも適用可能	配線の欠陥検出困難
今回の提案			
微小静電界(近接場)検出法 NEPS: Nano-Electrostatic field Probe Sensor (富士通)	レーザ励起静電界を専用検出器で検出	配線工程前でも適用可能 配線系にも適用可能	不明

レーザー照射により発生する電界と利用する電界

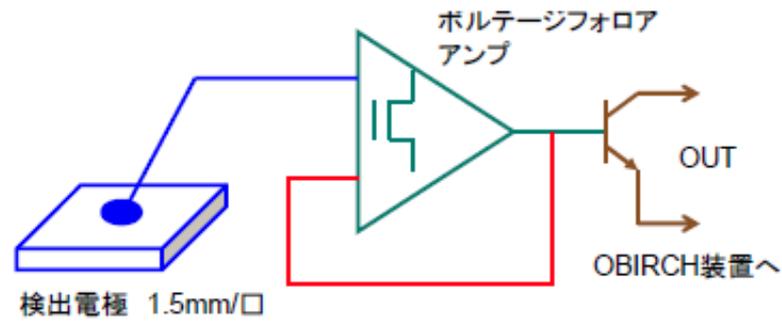
電界の性質 検出イメージと強度



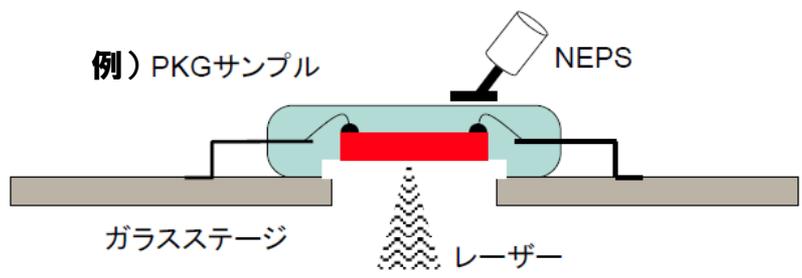
2009 Copyright FUJITSU MICROELECTRONICS LIMITED

概要: レーザビームをp-n接合に照射すると距離依存性の異なる3種類の電界が発生する。発生する電界はp-n接合近傍の構造や欠陥に依存した強度分布をもつ。このうち、最も急激に減衰する準静電界(近接場)をサンプル近傍で検出することで、高感度な欠陥観測が可能となる。レーザーの波長は光電流を発生する1083nm、光電流を発生せず加熱効果のみが得られる1340nmともに有効である。

NEPS解析例

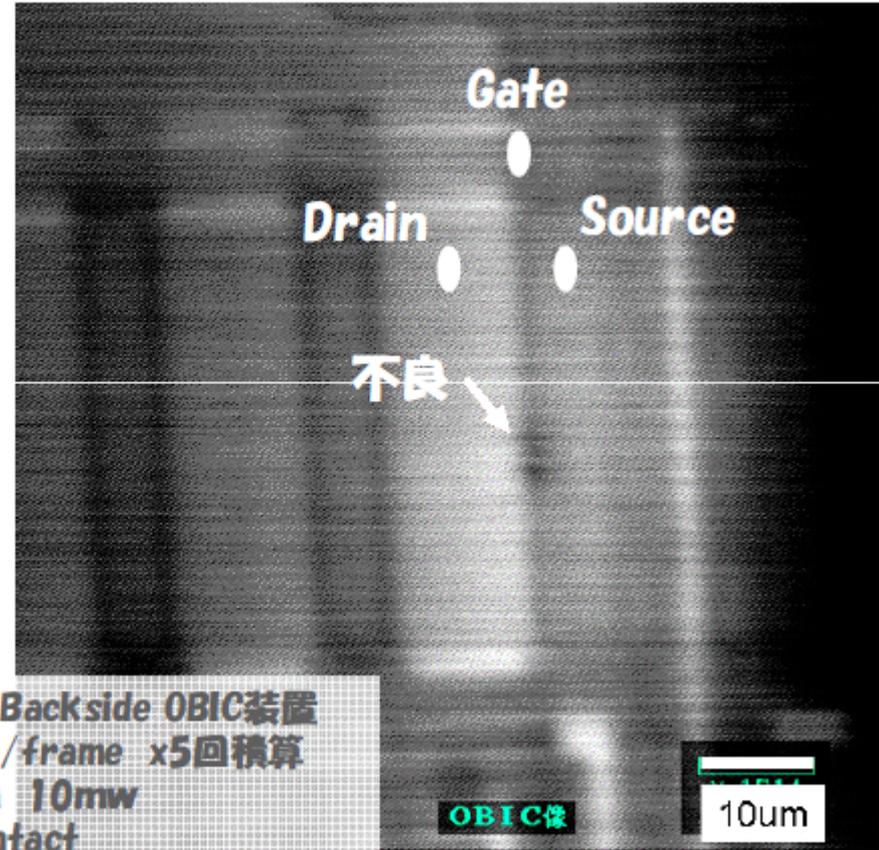


NEPS回路イメージ図



NEPS評価状態図

JEOL JBS-1181 Backside OBIC装置
Scan speed 8sec./frame x5回積算
Laser LD1083nm 10mw
Non Bias, Non Contact



2009 Copyright FUJITSU MICROELECTRONICS LIMITED

OBIC : Optical Beam Induced Current
OBIRCH : Optical Beam Induced Resistance Change

概要:裏面から波長 1084nmのレーザを照射して解析した。NMOS 保護トランジスタでこのようなコントラストが見られた。この部位は正常なP-N接合特性が失われ、このような黒い反応になったものである。同モードの他のサンプルについて物理解析調査を実施した結果、ゲート部のドレイン・ソース間で過電流が流れた痕跡が見つかった。

まとめ(故障解析SWG活動状況報告)

- 故障解析で新たに期待される計測は、非破壊、非接触、無バイアス、高感度、簡便性である。
- バルクと配線の両工程で利用できることが望ましいが必須ではない。
- NEPSに関しては、従来技術との比較検証による適用範囲・効果の確認が期待される。