

メトロロジーWG

“半導体ウエーハ計測/解析技術の最新動向”
(WG14, 故障解析SWGの活動から)

2014年3月7日

WG14 (株)東芝 山崎裕一郎

内容

- 2013年度STRJ WG14 活動報告
 - ITRS Metrology 国際活動
 - 国際会議動向
 - WG14 国内活動
 - 2013年度活動方針
 - 先端計測技術動向調査
 - 3次元計測技術
 - 歪計測技術
 - 先端X線技術
- 2013年度故障解析SWG活動報告

2013年度STRJ WG14活動報告

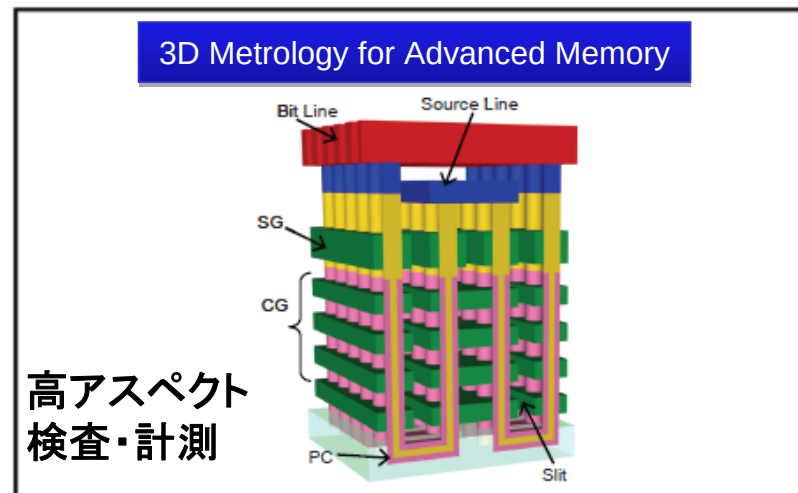
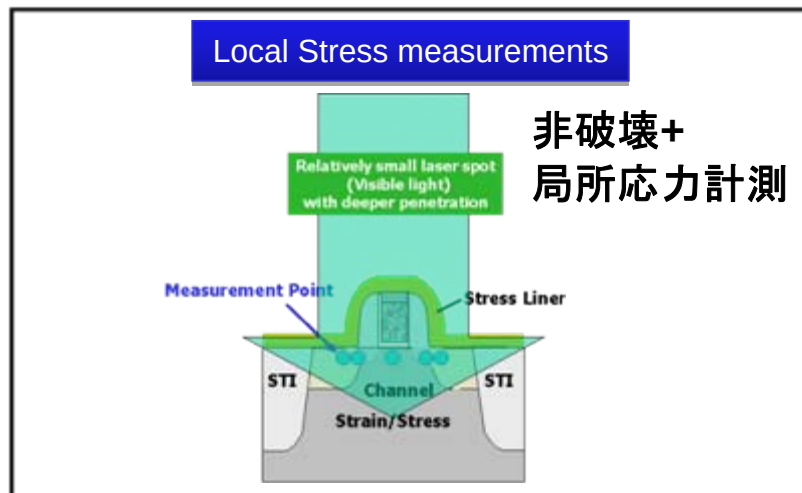
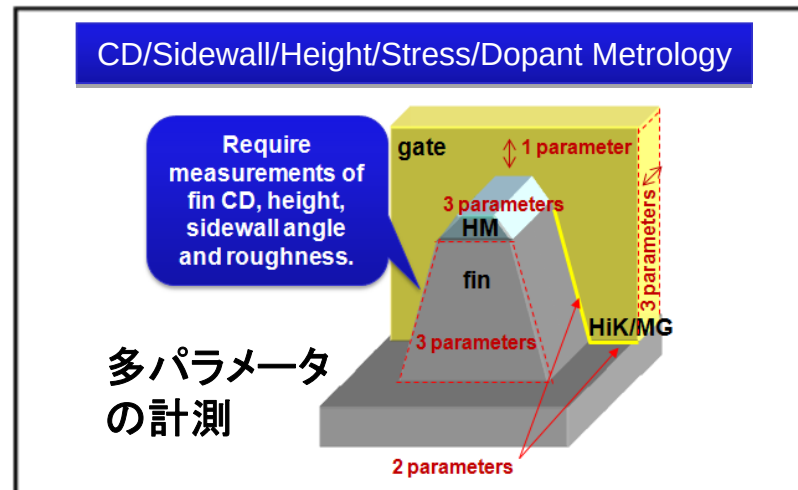
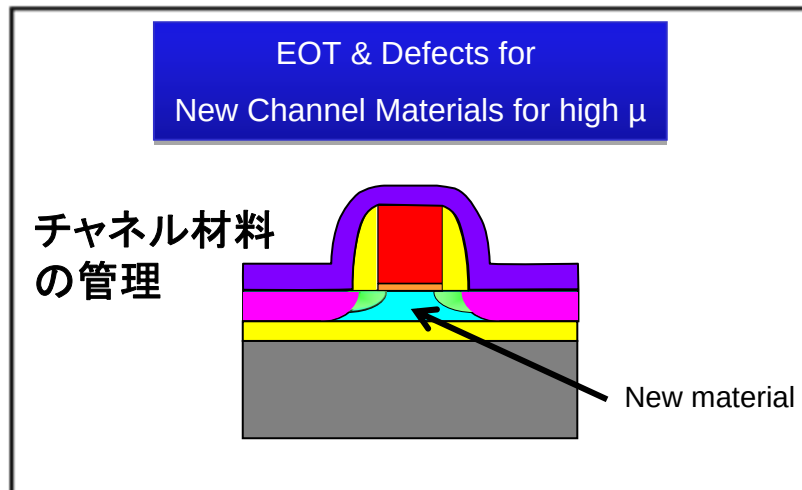
メンバー

山崎裕一郎	(東芝)
池野昌彦	(日立ハイテクノロジーズ)
五十嵐信行	(ルネサスエレクトロニクス)
片岡祐治	(富士通セミコンダクター)
嵯峨幸一郎	(ソニー)
畑 良文	(パナソニック)
市川昌和	(東京大学)
水野文夫	(明星大学)
新井 優	(産総研)
西萩一夫	(堀場製作所)
堺澤秀行	(NGR)

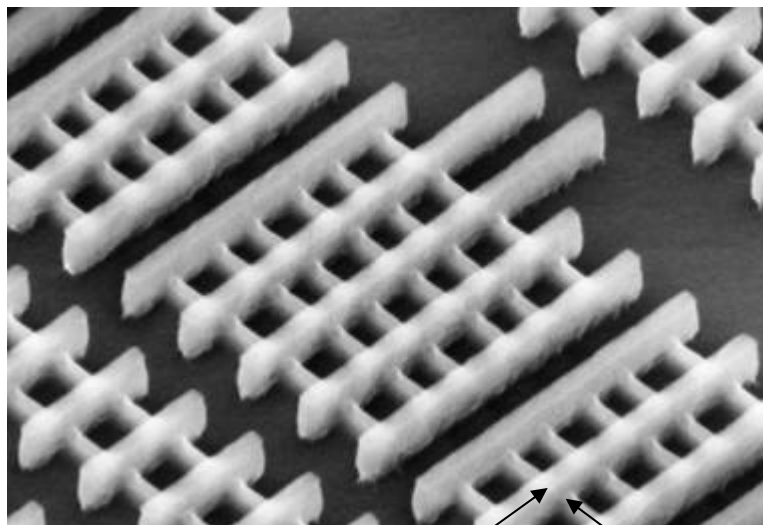
内容

- 2013年度STRJ WG14 活動報告
 - ITRS Metrology国際活動
 - WG14 国内活動
 - 2013年度活動方針
 - 先端計測技術動向調査
 - 3次元計測技術
 - 歪計測技術
 - 先端X線技術
- 2013年度故障解析SWG活動報告

FEP/PIDS計測技術ギャップ → EOT・局所歪・3D形状計測

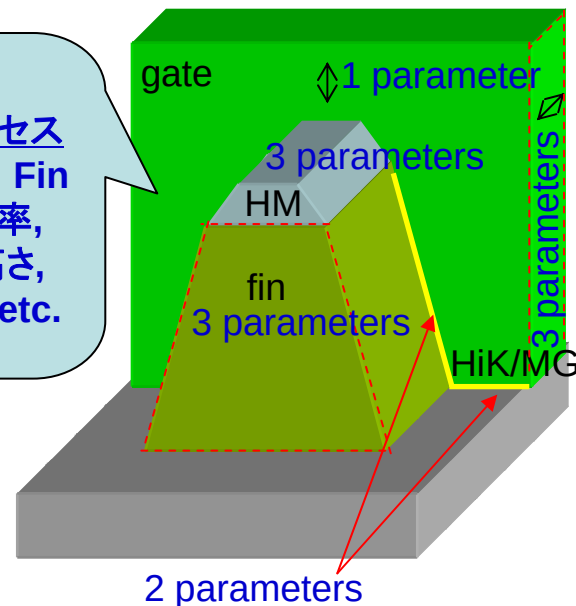


新デバイス構造に対応した計測技術候補について検討継続
Fin FETはロードマップ作成, 3Dメモリは着手できず



gates fins

計測要求
Fin側壁角, HiKリセス量, BOXリセス量, Fin
トップコーナー曲率,
Fin高さ, Gate高さ,
Fin表面ラフネス, etc.
>12パラメータ



- FinFETの3D構造の計測に対する要求が高まる
 - 12 パラメータ以上にもおよぶ多様な計測要求
 - ゲートのSpacerはさらにパラメータ数を増大
- 2011～OCDとCD-SEM/AFM等の複数の計測を組み合わせる(Hybrid Metrology)による高精度化が加速 (SPIE等での報告)
- ITRS2013 にFinFET等の3D計測の章の準備中

FEP/PIDS計測技術ギャップ → FinFET形状計測

Table MET3 Lithography Metrology (Wafer) Technology Requirements

Year of Production	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)(f)	20	18	17	15	14.2	13.0
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	32	28	25	23	20.0	17.9
MPU Physical Gate Length (GLph) (nm)	22	20	18	17	15.3	14.0
FinFET Process Parameter Metrology Requirements *****						
Metrology Uncertainty for Fin Sidewall Angle (°)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Metrology Uncertainty for Gate Sidewall Angle (°)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
 Metrology Uncertainty for HiK Recess (Undercut under gate) (nm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Metrology Uncertainty for BOX recess (nm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Metrology Uncertainty for fin top corner rounding radius (nm)	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
Metrology Uncertainty for bulk STI recess depth (nm)	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4
Metrology Uncertainty for fin height (nm)	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4
Metrology Uncertainty for gate height (nm)	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
Metrology Uncertainty for gate overhang (gate height above fin) (nm)	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4
Surface roughness (per FEP table 11), RMS, (1s, Å)	2	2	2	2	2	2
 Metrology Uncertainty for fin surface roughness (3s, nm)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12

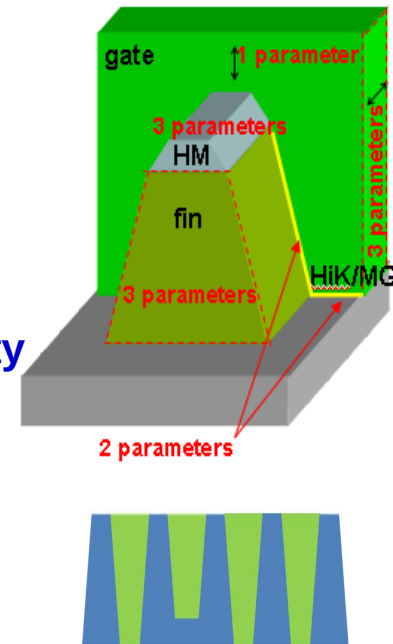
新たにFin FET形状の計測ロードマップを追加

Fin側壁角, HiKリセス量, BOXリセス量, Finトップコーナー曲率,
Fin高さ, Gate高さ, Fin表面ラフネス, etc.

Emphasis on 3D and on Directed Self Assembly

3D Metrology

- Computational metrology (complementary, hybrid) combined with state-of-the-art statistical analyses to reduce measurement uncertainty
- 3D atom positions, contact resistance (ERM/ERD)
- Metrology to ensure proper 3D shape of the structure (Litho)
- Metrology for layered architecture for 3D stack (Interconnect)



Directed Self Assembly (DSA)

- *Metrology for full 3D profile, and defectivity, including bridging and void defects (ERM)*
- Metrology for material-, process-, device-dependent properties with low contrast (ERM)
- Metrology to detect low densities of surface and buried defects (ERM)
- *Overlay metrology for DSA is important More sampling at higher rates is needed to fully capture overlay shifts (Litho) Overlay shift in DSA is not systematic.*

内容

- **2013年度STRJ WG14 活動報告**
 - ITRS Metrology 国際活動
 - **WG14 国内活動**
 - 2013年度WG14活動方針
 - 先端計測技術動向調査
 - 3次元計測技術
 - 歪計測技術
 - 先端X線技術
- 2013年度故障解析SWG活動報告

2013年度WG14活動方針

国内活動の基本方針

先端計測技術の国内の要素
技術動向を調査し、今後の計
測技術の方向性をまとめる

- ・パッケージ
- ・TSV
- ・3Dトランジスター/メモリ
- ・先端デバイス

TSV : Through Si Via

CT : Computational Tomography

GI : Grazing Incident

SAXS : Small Angle X-ray Scattering

SEM : Scanning Electron Microscopy

TEM : Transmission Electron Microscopy

3D計測技術(2010年度)

- ・TEM/X線トモグラフィ-
- ・GI-SAXS
- ・・・コンセプトは良いが3Dトランジスタ, 3Dメモリに向けた精度, 実用性能は未達成

TSV計測技術(2011年度)

- ・赤外光学式深さ計測技術
- ・X線CT技術
- ・X線干渉顕微鏡 (Talbot-Lau干渉計)
- ・・・TSV要求計測精度は満足するレベルを確認

先端高精度計測技術(2012-2013年度)

3D計測技術開発updateと新規計測技術の動向調査

- ・3次元計測技術(電子線トモグラフィ, 測長AFM)
- ・歪計測技術 (CBED, SAD, ラマン分光)
- ・先端X線技術(高精度ミラー加工, 高輝度X線源)
- ・・・2012年に引き続き、国内における高精度計測の最新動向を検証し、今後の課題を確認

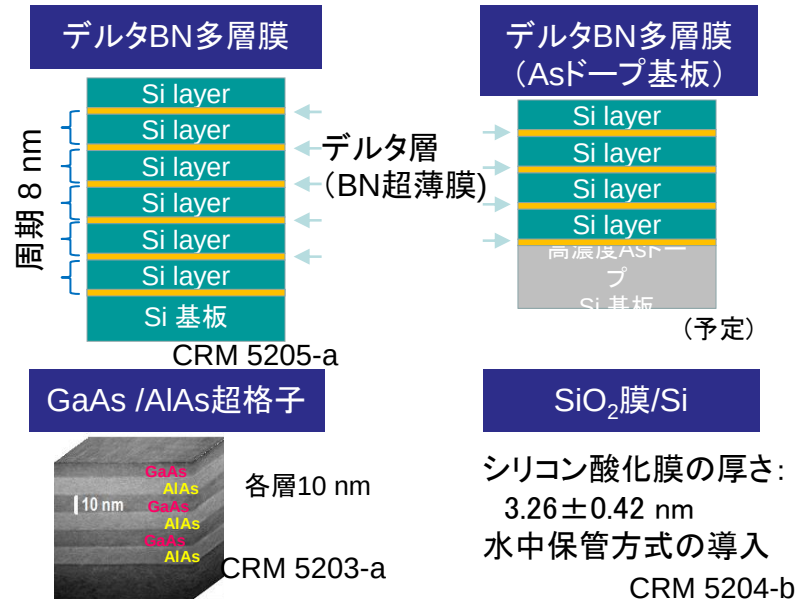
WG14活動 先端計測技術動向調査

- 3D計測技術の最新動向(産総研の取り組み)
 - 垂直線幅の絶対校正技術（産総研 権田聡様）
 - 電子線ホログラフィー（産総研 林田美咲様）
- 歪計測技術
- 先端X線技術

産総研 校正技術・標準物質の開発

深さ分析の校正用 薄膜標準物質

二次イオン質量分析 (SIMS) のISO規格に準拠した標準物質



Quantification

Boron in Si

ISO 14237
Quantitative analysis of B

ISO 18114
Relative sensitivity factor

ISO 17560
Depth-profiling of B in Si

ISO 12406
Depth-profiling of As in Si

Depth profiling

Multiple Delta-Layer RMs

ISO 20341
Estimation of depth resolution parameters

ISO 23812
Depth calibration method

Cs⁺, O₂⁺, Bi⁺ Secondary Ion



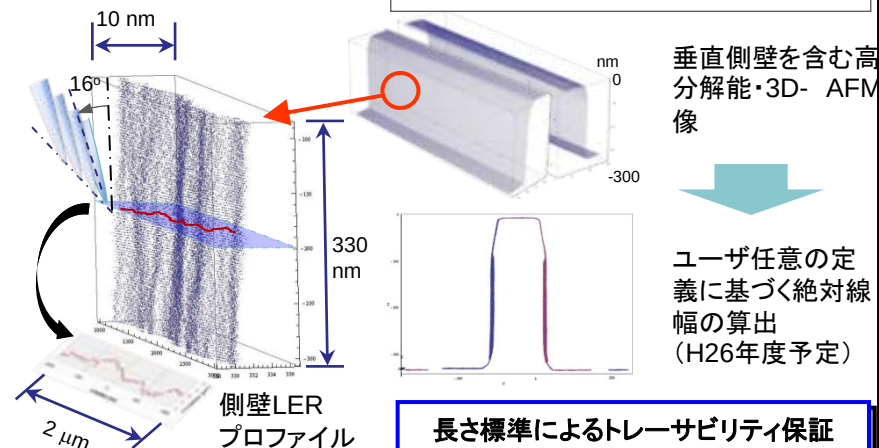
膜厚校正サービス

迅速な膜厚標準の供給

垂直線幅の絶対校正技術

AFM傾斜探針走査法

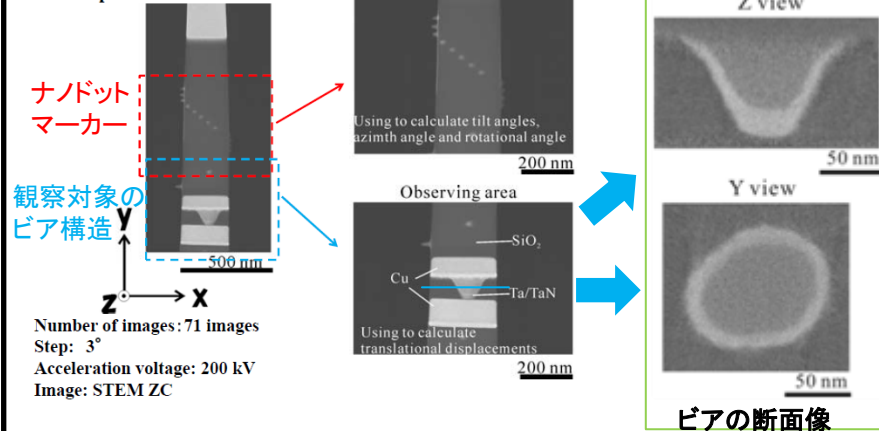
超高分解能レーザ測長技術と傾斜探針の3D走査技術を組み合わせ実現



電子線トモグラフィー技術

ヘリウムイオン顕微鏡 (HIM) で作製したナドットをマーカーとして3D再構成像の高精度化を実現

Sample: Via structure of 50 nm diameter in Cu/Low-k interconnect



産総研 校正サービス・標準物質

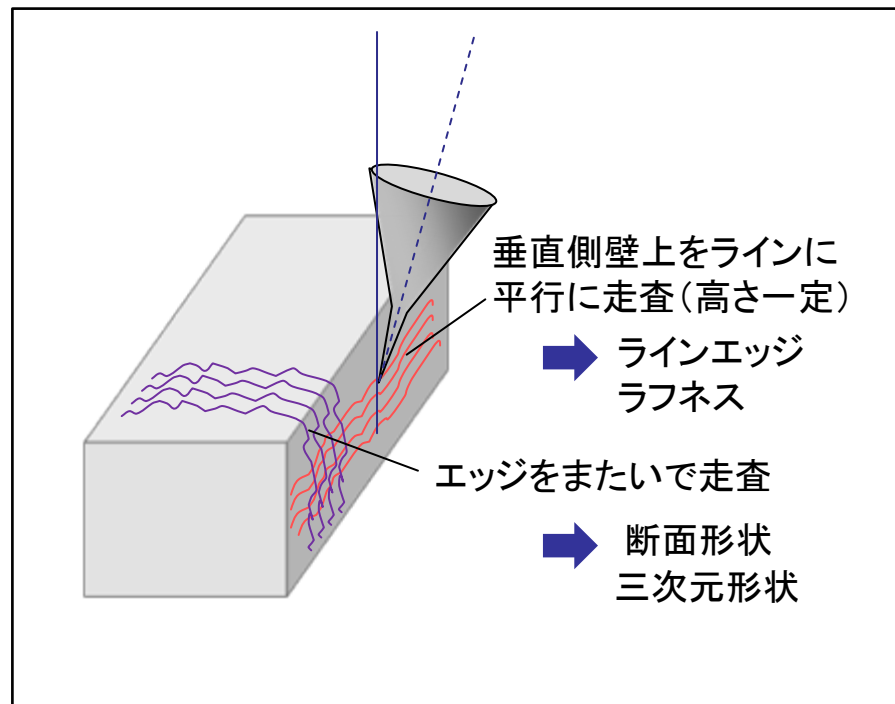
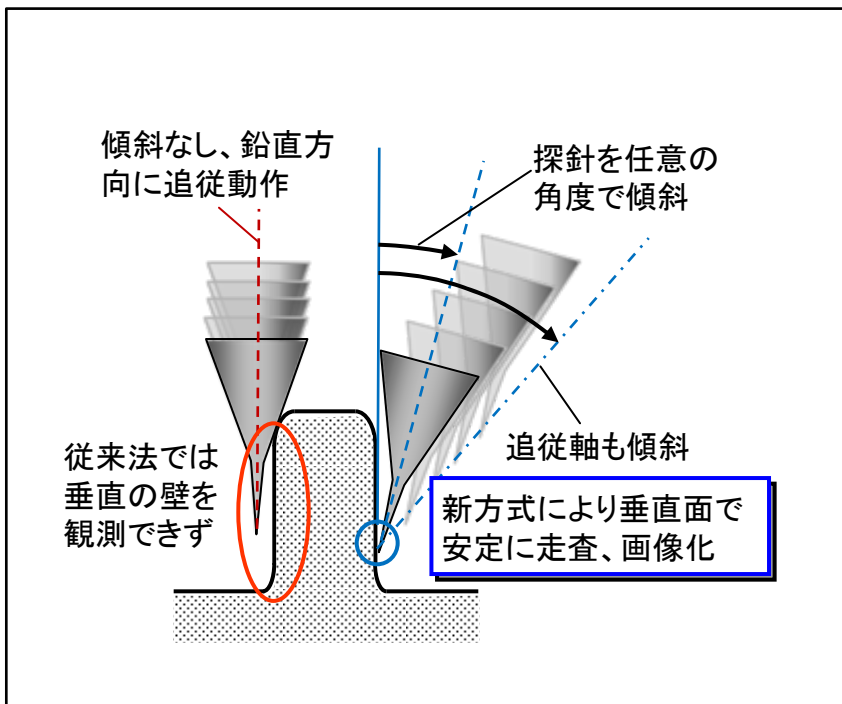


サービス項目		FY 2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
校正 サー ビス	L&S ピッチ	①測長AFM による校正(ピッチ: 23 nm - 8 μm) ②DUVレーザ回折計による校正 (同97 nm - 10 μm) X線回折計による校正 (ピッチ: 23 nm 以下) ※産総研により実施予定										
	段差	①測長AFMによる校正 (段差: 10 nm - 2.5 μm) ②干渉顕微鏡による校正 (段差: 20 nm - 500 nm)										
	線幅	AFMおよびSEMIによる校正 (マスク線幅: 500 nm - 10 μm)				範囲拡大予定 (線幅: 500 nm - 10 mm) 傾斜探針AFMによる校正 (線幅: 10 nm - 500 nm)						
	ラインエッジラフネス、線幅ラフネス、側壁角度 (AFM)						測長AFMによる校正 (表面粗さ: 10 nm - 500 nm) 傾斜探針AFMによる校正を検討 (エッジラフネス等)					
	薄膜・多層膜構造の厚さ校正					XRR法による膜厚校正(各層:1 nm～200 nm, 総厚:3 nm～200 nm)						
	平面度	大口径フィゾー干渉計による校正 (測定領域: φ300 mm以下, 不確かさ～ 10 nm) Scanning Deflectometric Profiler (SDP)による校正 (測定領域: φ500 mm以下)										
標準 物質	多層膜・単層膜標準物質	SiO ₂ /Si多層膜(各層20 nm)、GaAs/AlAs超格子(各層10 nm) SiO ₂ 膜(厚さ3.26 nm)/Si基板 (供給厚さの拡大検討)										
	デルタBN多層膜標準物質 (超薄膜挿入層)	極薄BN層/Si層(周期:8 nm)					通常濃度ドーパントSi基板つき 高濃度(Asドーブ・Bドーブ)Si基板つき(検討中)					
	半導体組成標準物質	極浅イオン注入(ヒ素、～10nm)				(ドーブ種、注入分布の拡大検討)						
		酸化ハフニウム薄膜 (≒4nm)							SiGe、GaNなど化合物半導体(検討中)			

垂直線幅の絶対校正技術

- AFMの傾斜探針による垂直側壁上の走査 -

- 円すい角以上の傾斜により探針先端が垂直側壁に接触
- Z軸の追従方向を傾斜
- エッジに対し垂直に走査：断面プロファイル三次元形状
- エッジに沿って走査：エッジラフネスの評価



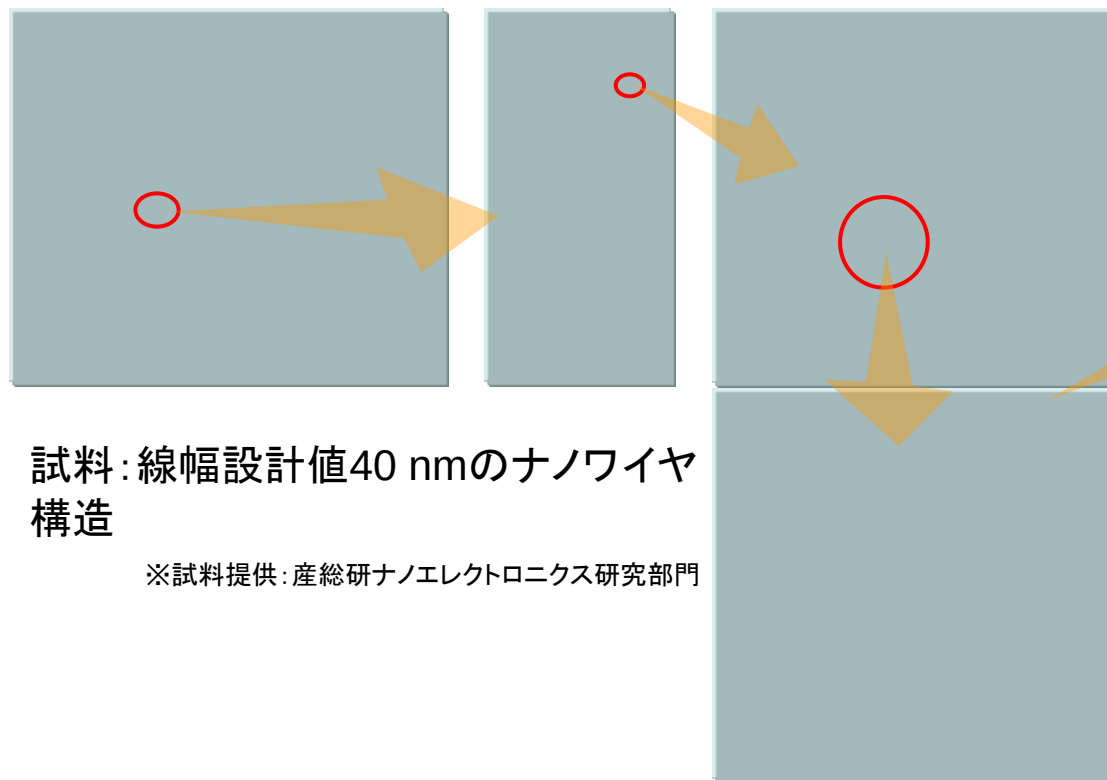
トレーサブルAFMの開発

- ・CD-SEMの校正サンプル供給に貢献
- ・OCD, etc の3D形状校正手法として期待
- ・Hybrid Metrology として可能性あり

垂直線幅の絶対校正技術

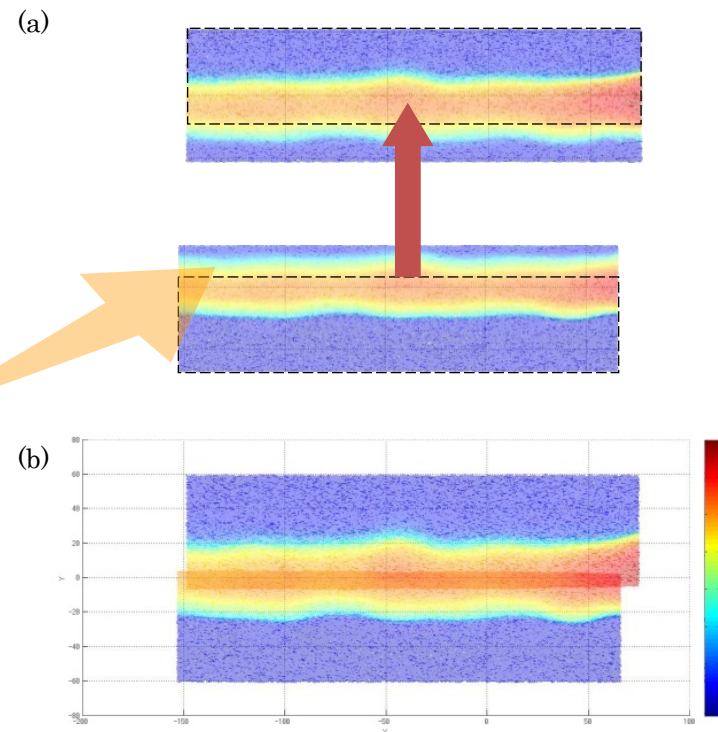
-ナノワイヤ構造の三次元可視化事例-

Nanowire structure with nominal linewidth of 40 nm



試料: 線幅設計値40 nmのナノワイヤ構造

※試料提供: 産総研ナノエレクトロニクス研究部門



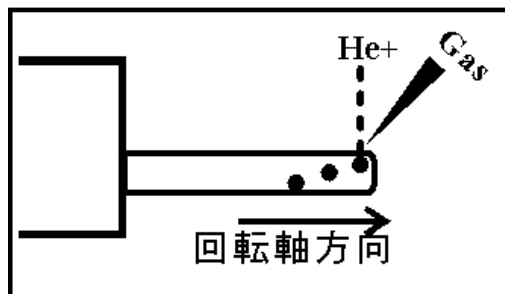
設計幅40 nmのナノワイヤ試料の(a)左右側壁の三次元AFM像と(b)両者を合成する作業の例。

左右両側壁のAFM像を結合して三次元形状を構築

特徴的な形状をマッチングして貼り合わせるアルゴリズムが課題

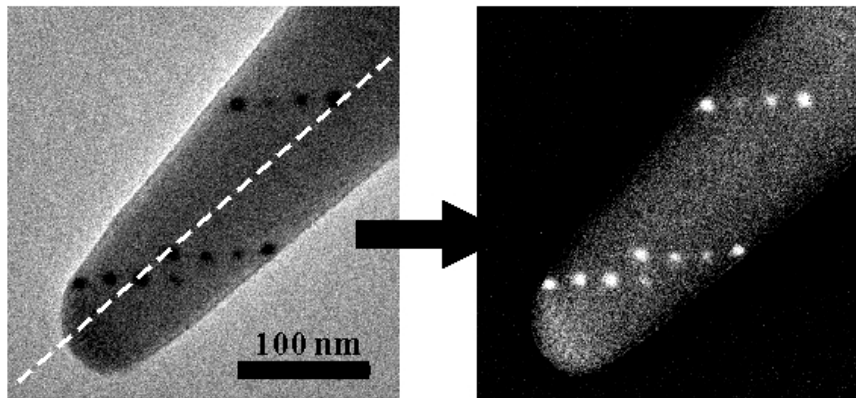
電子線トモグラフィ技術 - HIMマーカーを用いた高精度3次元形状再構築 -

① マーカー作製

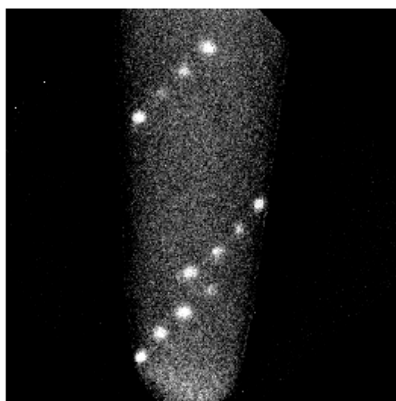


回転軸方向に重ならない
ように間を開けて作製

② コントラスト補正

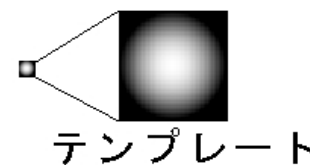
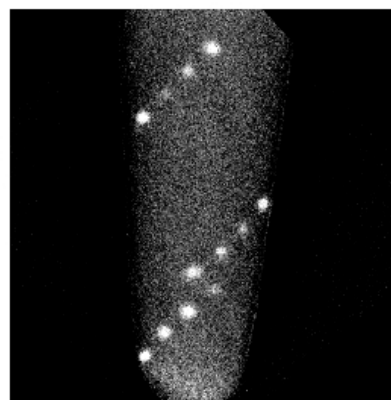


③ コースアライメント*



おおまかに
回転と平行移動を補正

④ テンプレートマッチング

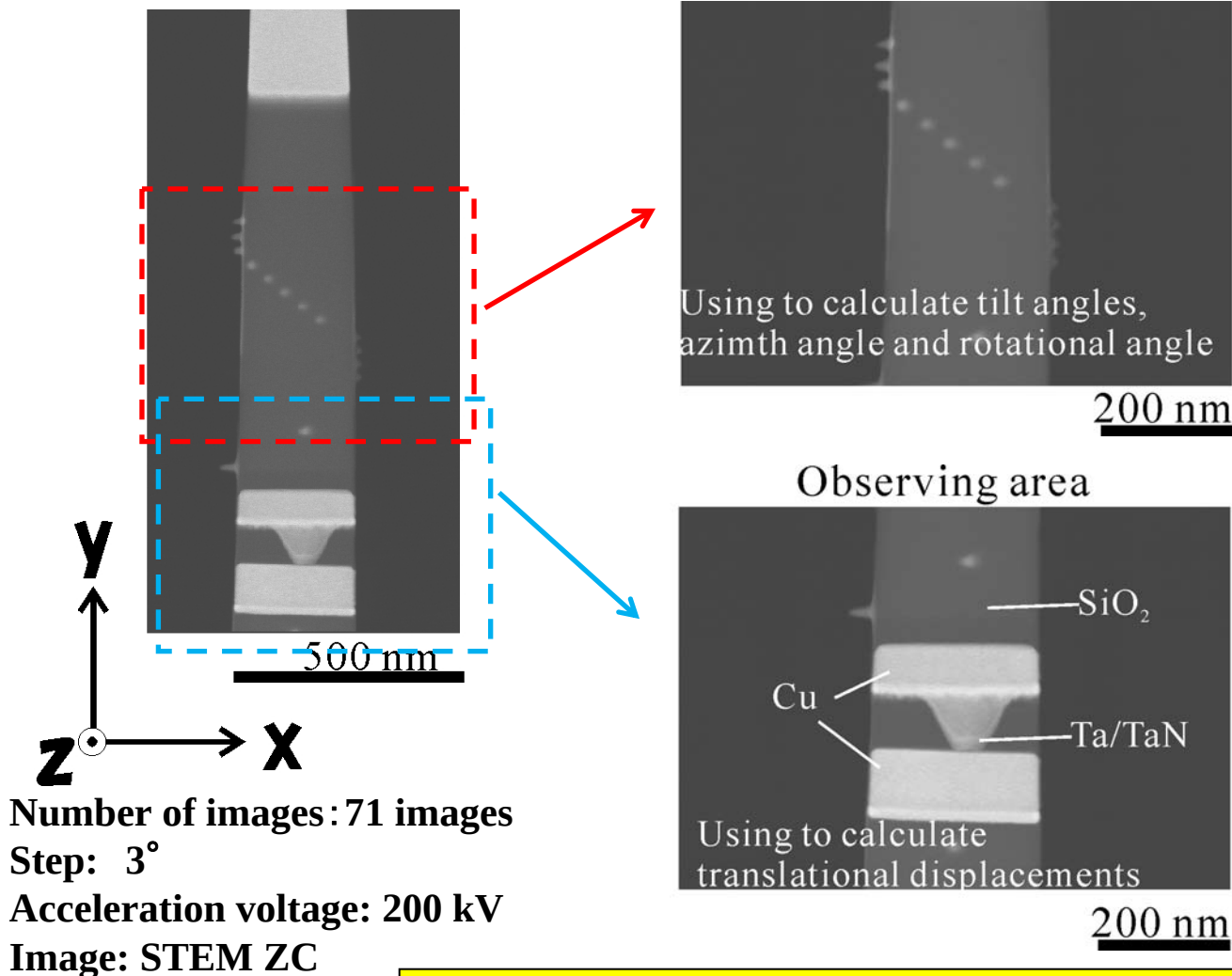


テンプレート画像は外側へいくほど暗くなる
一番大きいマーカーとほぼ同じ半径にする。

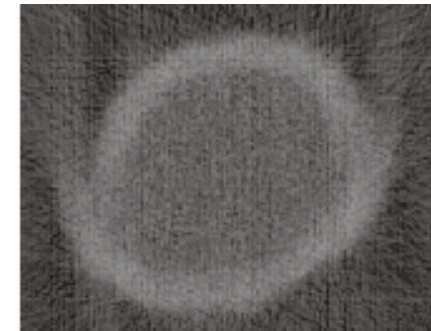
*M. Hayashida, S.Terauchi and T. Fujimoto, Micron 41, 540-545 (2010)

電子線トモグラフィ技術 - HIMマーキングの半導体デバイス観察への応用 -

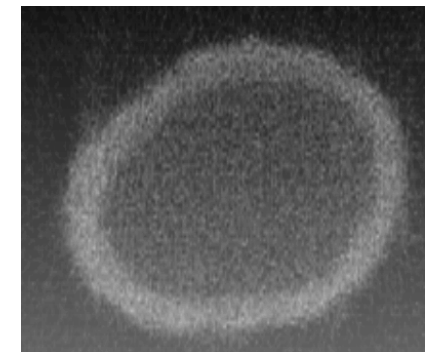
Sample: Via structure of 50 nm diameter in Cu/Low-k interconnect



断面像



従来法



本手法

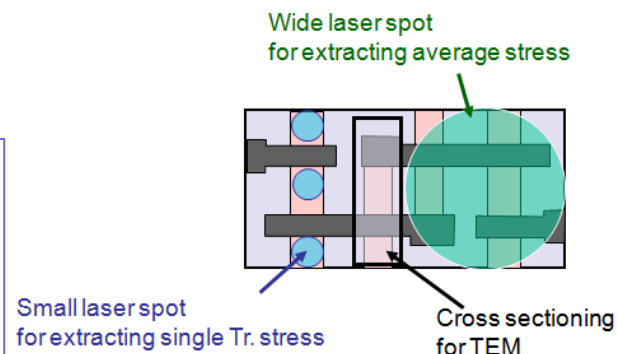
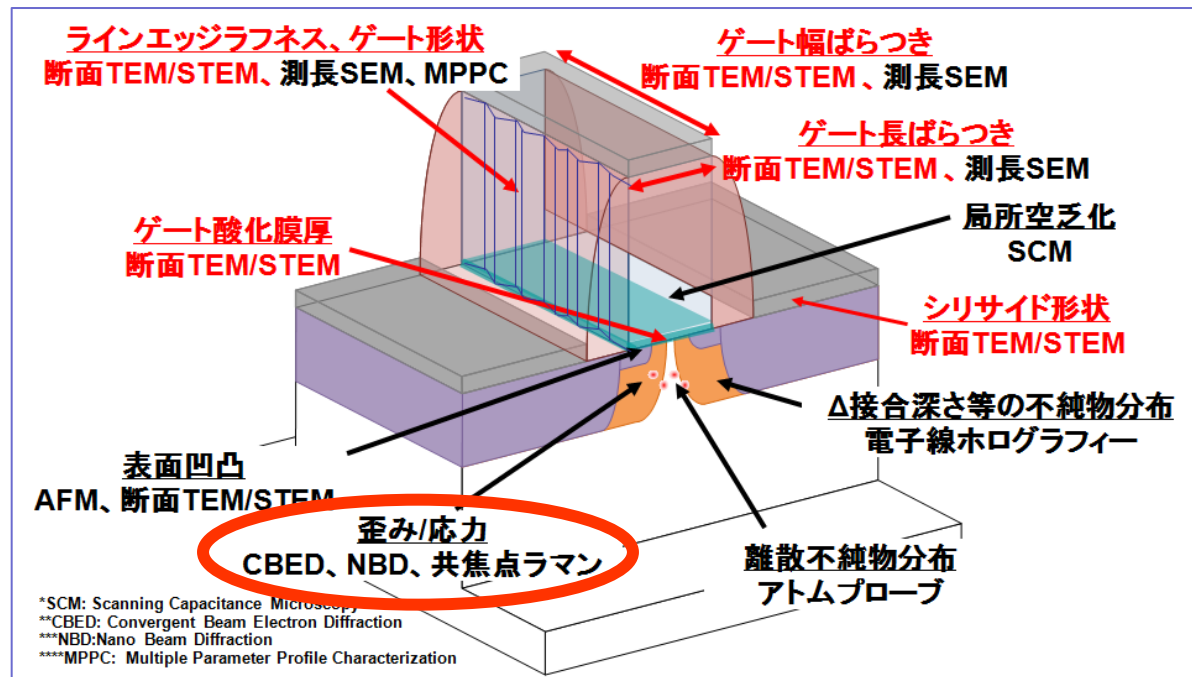
HIMマーカを自動追尾することで、高精度なトモグラフィ画像構築が可能になる

WG14活動 先端計測技術動向調査

- 3D計測技術の最新動向
- 先端歪計測(局所歪計測)技術
 - CBED法(富士通研究所 添田武志様)
 - SAD法(日立ハイテクノロジーズ 松本弘昭様)
 - ラマン分光法(産総研 多田哲也様)
- 先端X線技術

先端歪計測(局所歪計測)技術動向

トランジスタ特性に影響を及ぼす物理量
→ 局所歪/応力に注目



a) 平面方向歪分布の計測



b) 断面方向歪分布の計測

2013年WG14活動にて国内専門家より3件のヒアリングを実施

- ① 集束電子回折法 (Convergent-Beam Electron Diffraction: CBED)
- ② 微小制限視野電子回折法 (Selected Area Diffraction: SAD)
- ③ ラマン分光法 (Raman Spectroscopy)

①収束電子回折(CBED)による歪み解析

富士通研究所 添田武志様

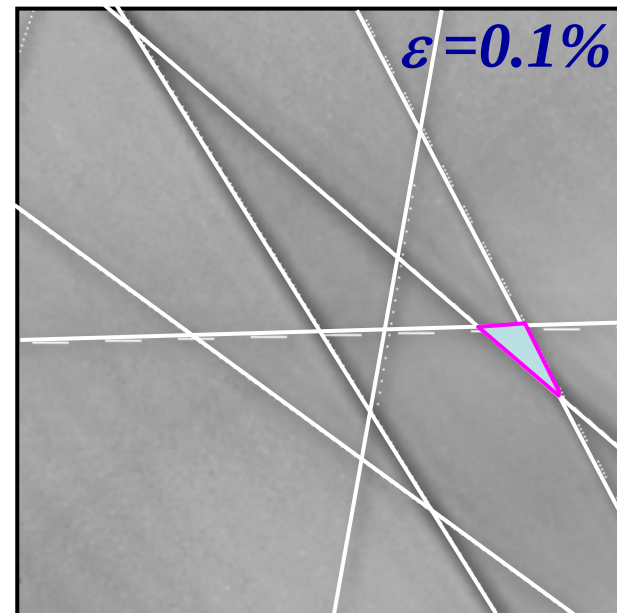
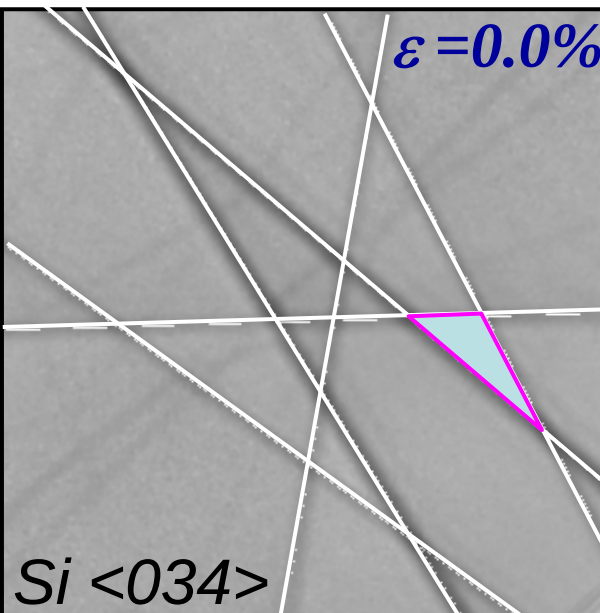
収束電子線を斜め入射し、HOLZ図形の変化を解析

Ref.

歪み領域

$\varepsilon = 0.0\%$

$\varepsilon = 0.1\%$

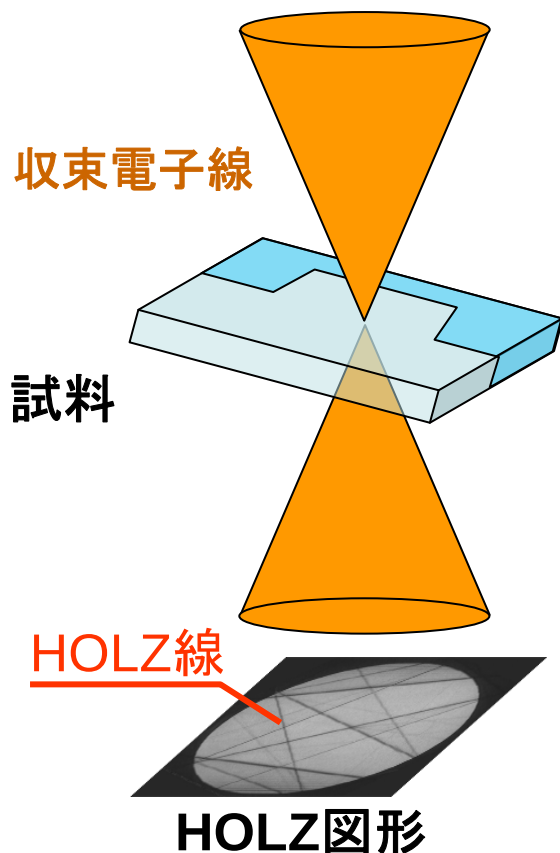


HOLZ (High Order Laue Zone) 線の出現位置は
格子定数に敏感



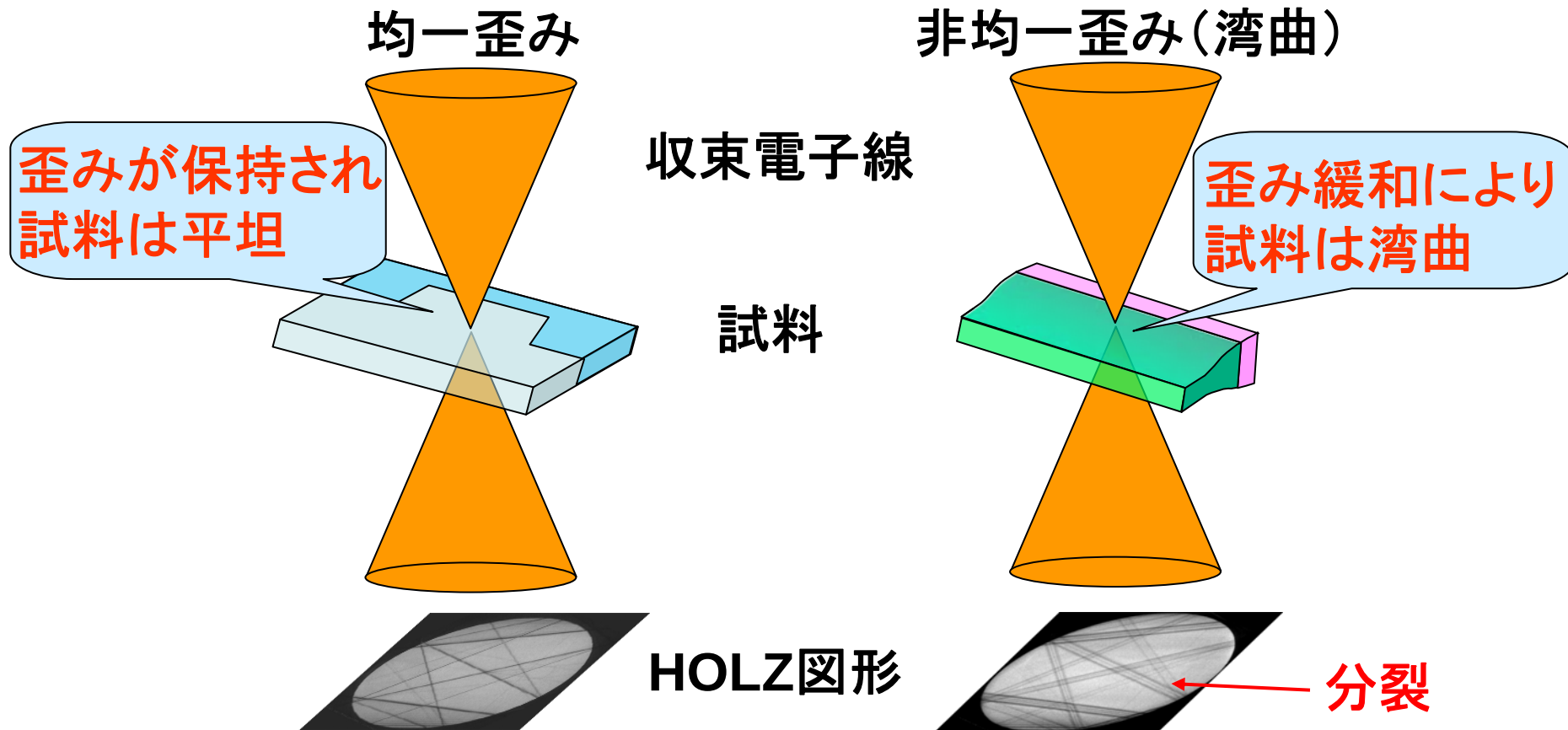
HOLZ図形から、精密な歪み測定が可能

CBED: Convergent-Beam Electron Diffraction



①収束電子回折(CBED)による歪み解析

-CBED法の問題点-



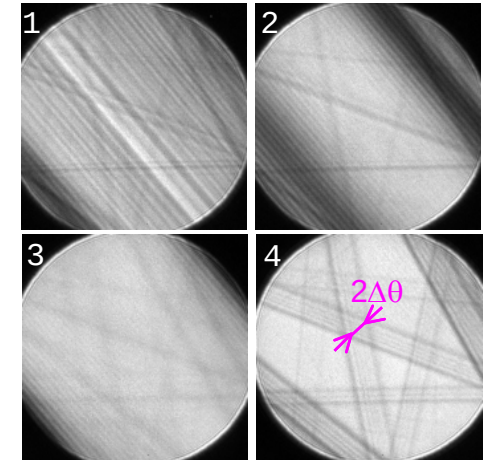
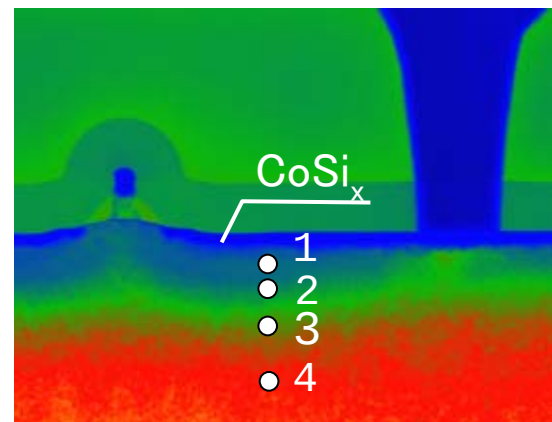
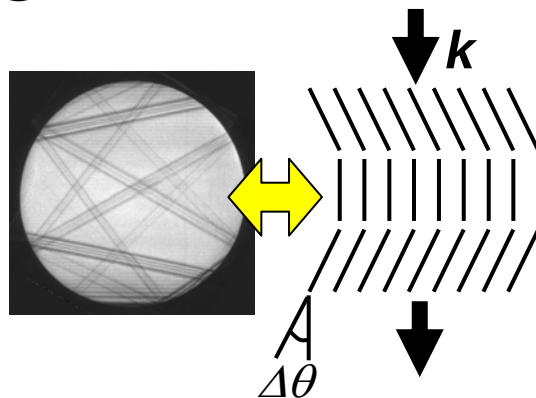
応力源によっては、歪み緩和により試料が湾曲し、HOLZ線が分裂



非均一歪み(湾曲)に対応できる新たな解析手法が必要

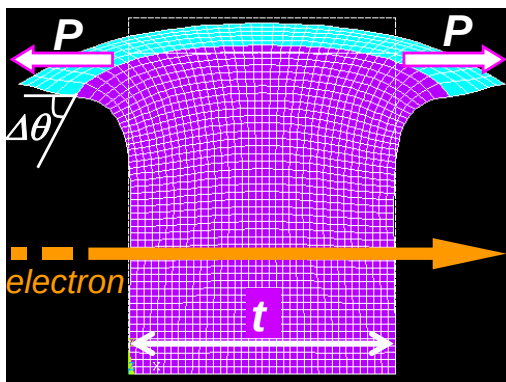
①収束電子回折(CBED)による歪み解析 -非均一歪み(湾曲)の解析手法(Split-HOLZ法)

① CBED解析

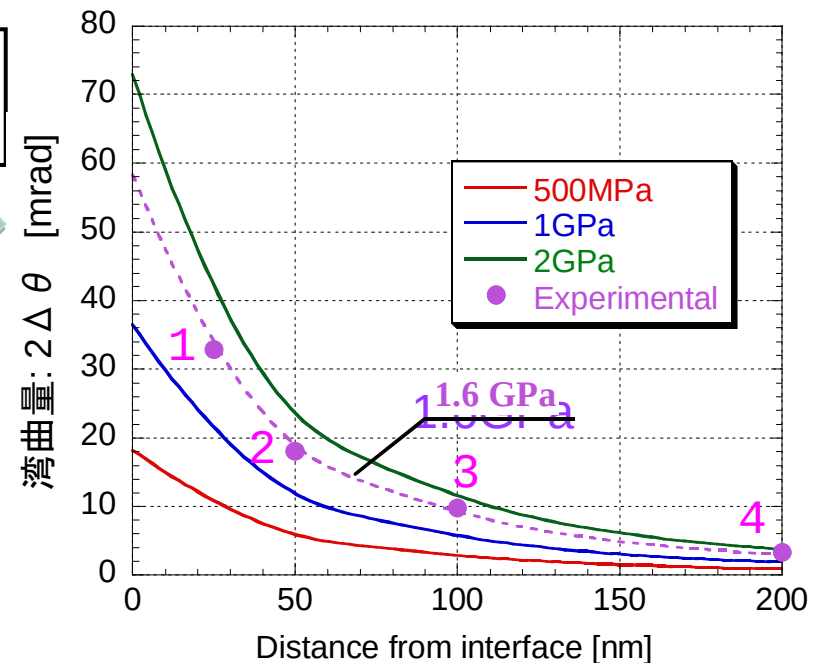


■ HOLZ線分裂幅から結晶の湾曲量を評価

② 有限要素法解析



湾曲量より
応力を解析

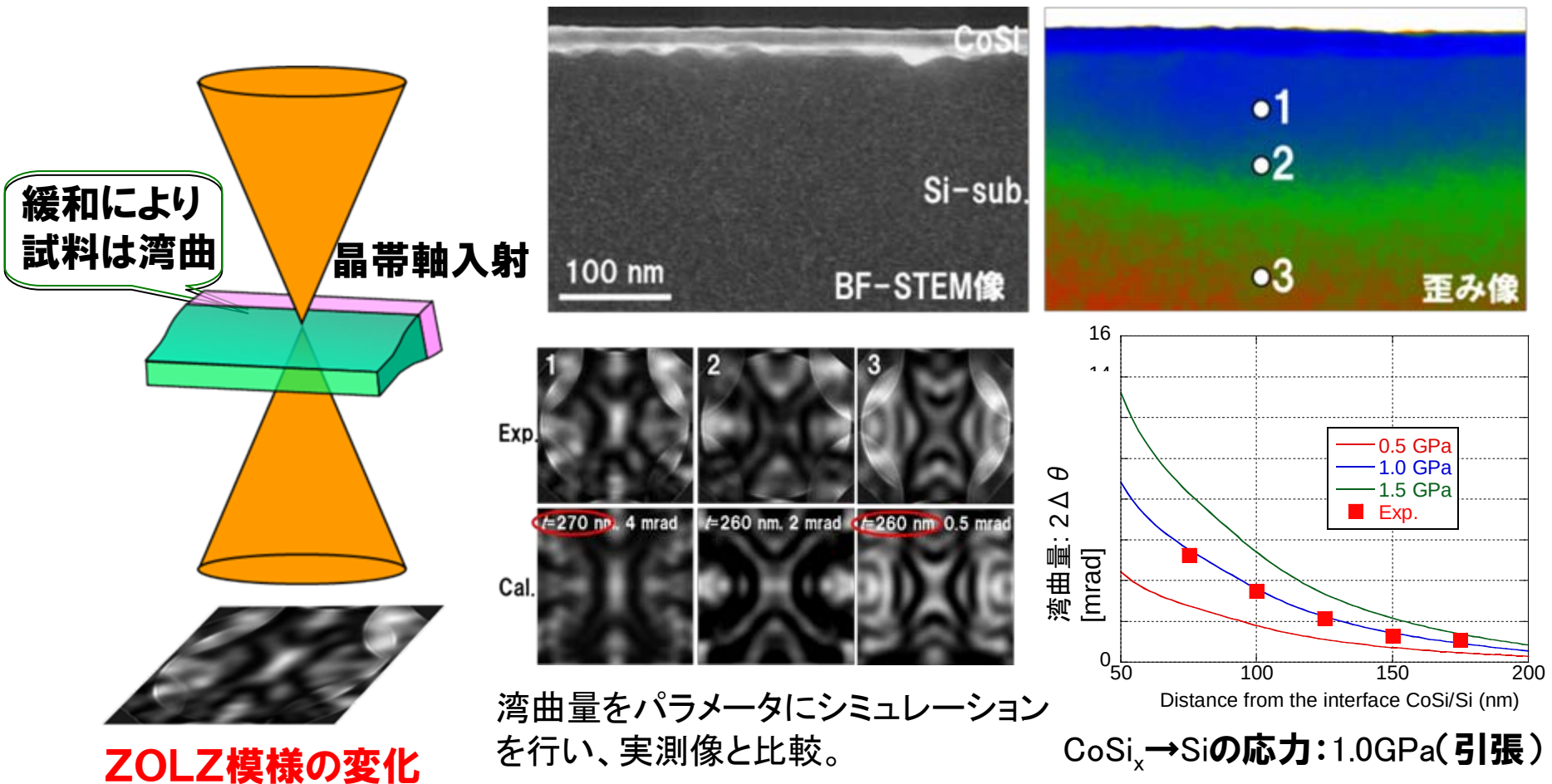


CoSi_x→Siの応力: 1.6GPa

■ 結晶の湾曲量と応力の
関係进行评估

①収束電子回折(CBED)による歪み解析 -高分解能な非均一歪み(湾曲)解析手法(ZOLZ法)-

収束電子線を垂直入射し、ZOLZ模様の変化を解析(ZOLZ法)



試料傾斜させない分、実効的な空間分解能を保った歪み評価が可能

①収束電子回折(CBED)による歪み解析 -解析手法のまとめ-

■ 歪みの形態や求める空間分解能により、選択する方法が異なる。

	CBED法	Split-HOLZ法	ZOLZ法
評価の対象	均一歪み	非均一歪み	非均一歪み
歪み源の形態	サンドイッチ型	積層型	積層型
測定物	HOLZ幾何模様	HOLZ線の分裂幅	ZOLZ幾何模様
試料傾斜	要	要	不要
動力学的考察	不要	要	要

■ Split-HOLZ法とZOLZ法はFEMと併用することで、複雑な形状の歪み解析が可能になる。

■ 従来のCBED法は、最終的に導入された結晶の歪み評価であり、ストレッサーの特定および応力の定量は不可能。

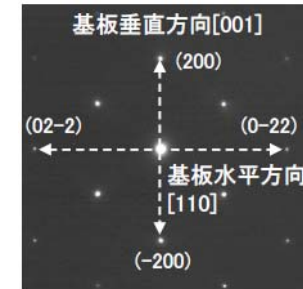
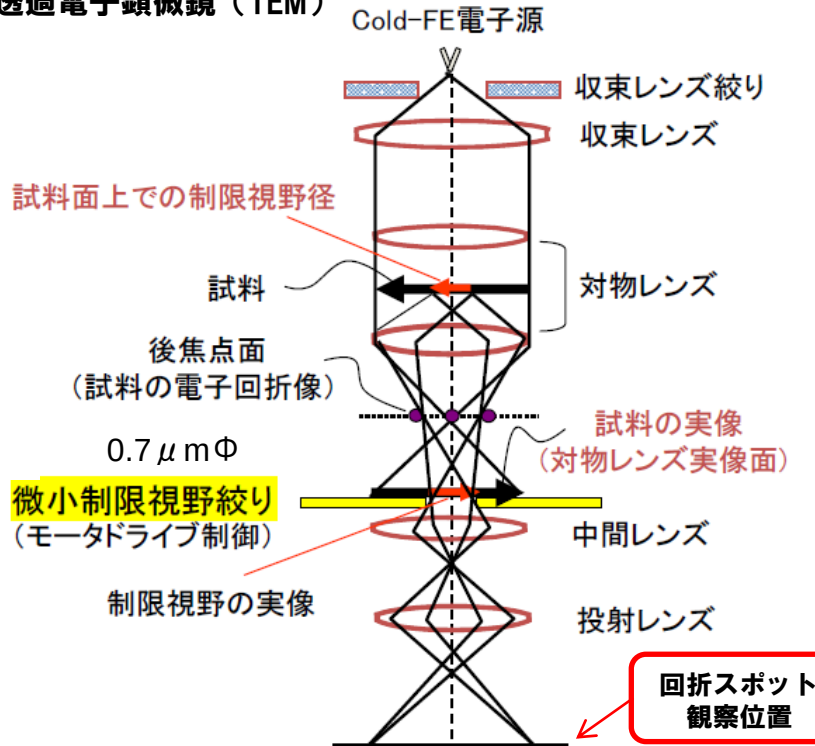
■ Split-HOLZ法とZOLZ法は、ストレッサーの応力を定量でき、設計およびプロセスにより有益な情報を提供することが可能。

②微小制限視野電子回折(SAD)法による歪計測

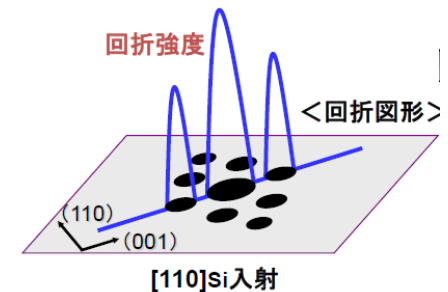
日立ハイテク 松本弘昭様

- ◆ SAD (Selected Area Diffraction) 法はナノビーム回折 NBD (Nano Beam Diffraction) 法の改良技術
- ◆ SAD法、NBD法ともに試料観察部に絞った電子線を照射し、試料からの回折スポット間の距離を測り歪量を算出
 - スポットのシャープさが重要
 - SAD法では微小な「視野絞り」を導入しスポットをシャープにした

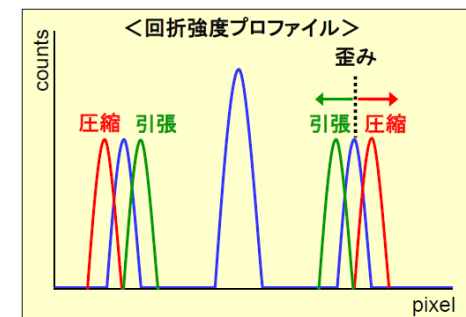
透過電子顕微鏡 (TEM)



回折スポット像

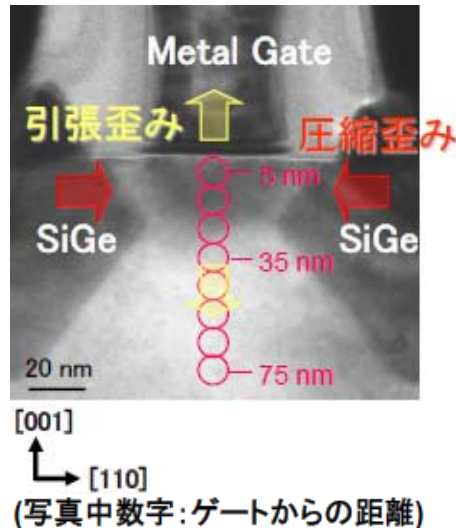


回折スポット間の距離を測定



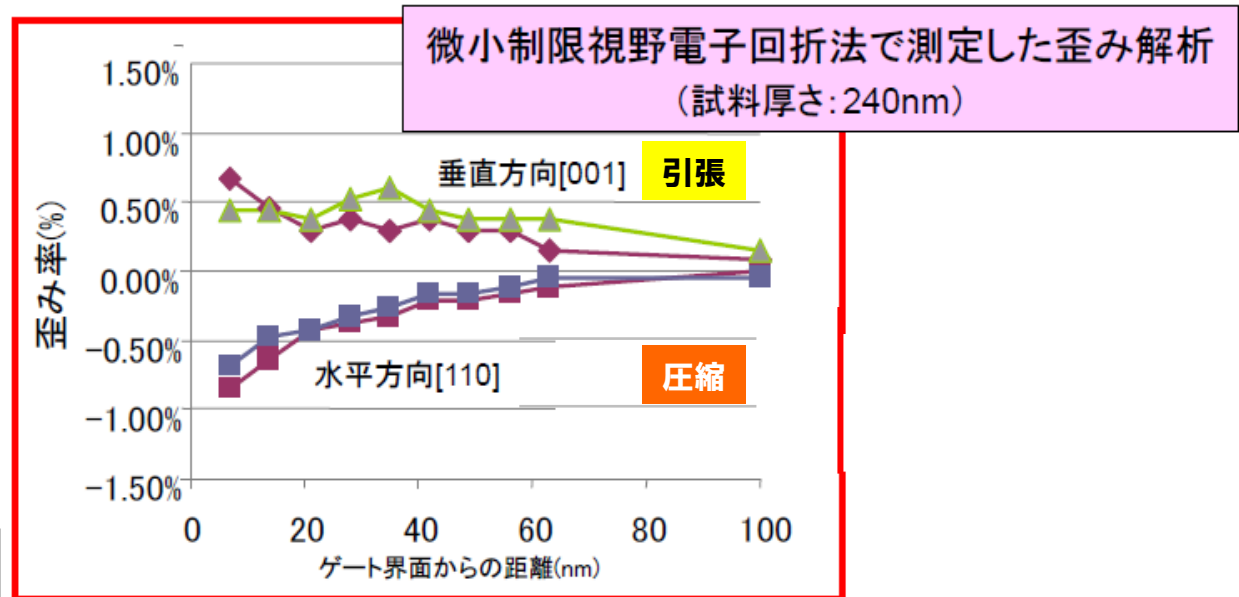
②微小制限視野電子回折(SAD)法による歪計測

45nm PMOS Trの歪分布評価例



リファレンス部

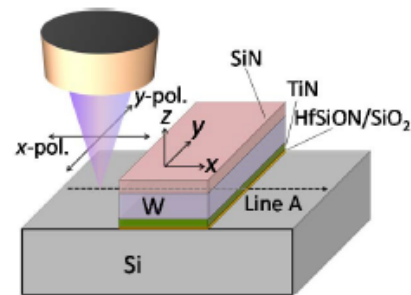
ゲートから200nm下方のSi基板領域



- PMOS Trゲート直下の垂直方向並びに水平方向の歪分布を評価
水平方向には-0.08 %の圧縮歪、垂直方向には0.07 %の引張歪を観測
- チャンネル下方へ移るにつれ歪が緩和
- 従来のNBD法に比べSAD法では計測データ再現性が向上

③ラマン分光法による歪計測

産総研 多田哲也様



1. ラマン分光法による歪計測の特徴

- 非破壊計測 (Top down観察の場合)
- 高速かつ2Dマッピングが可能

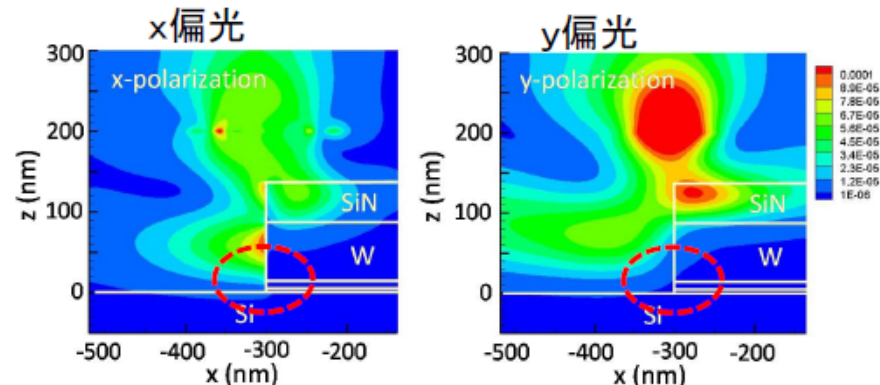
2. ラマン分光法による局所応力計測の問題点

- ラマンスペクトル (散乱ピークシフト量) だけでは歪の方向と大きさを知ることができない
- サンプル構造によっては励起光がパターン底部まで十分届かず、ラマンスペクトルに影響

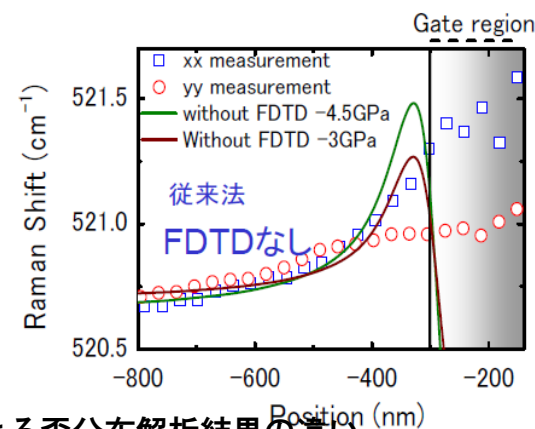
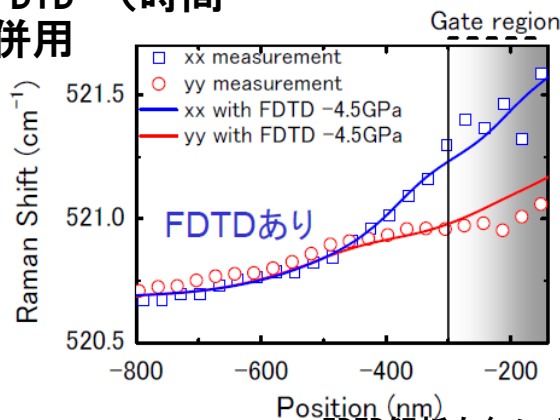
3. 対応策

- 歪の3軸方向成分を分離するため偏光 (照明、受光) 配置を設定
- 正確なラマン散乱過程を知るためFDTD (時間領域差分法) による電磁場解析を併用

FDTD: Finite Difference Time Domain



ゲートエッジ底部での励起光強度分布 (FDTD解析)

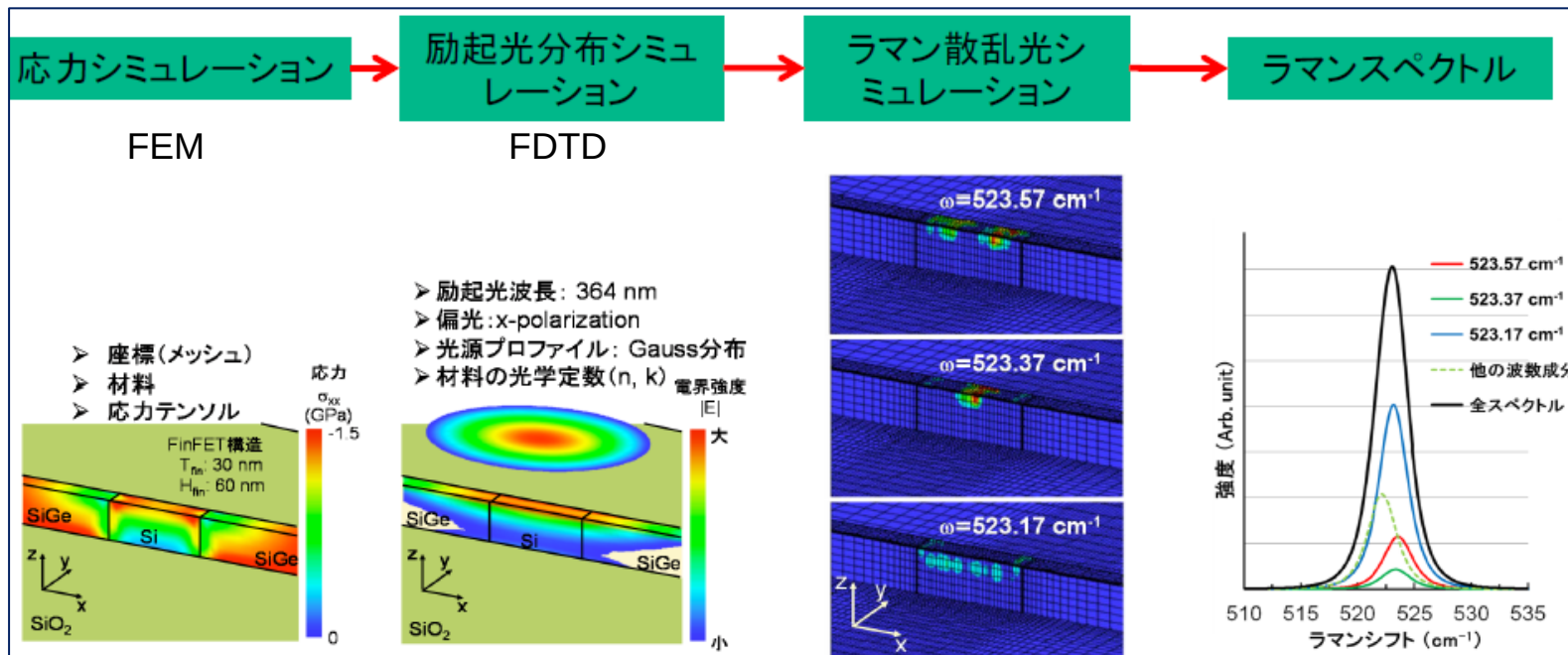


FDTD解析有無による歪分布解析結果の違い

③ラマン分光法による歪計測

◆ 応力解析(FEM)と電磁場解析(FDTD)を結合した
ラマン分光シミュレーションシステムを開発

産総研 多田哲也様

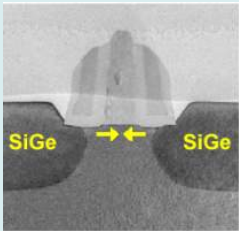


ラマン散乱の計測過程をきちんとシミュレート

メタルゲート・スタック構造の実験データと比較
→正しい応力値を与える
奥行き方向にも応力分布も評価する必要がある場合
2D-FDTDシミュレーションを3D化

ラマン分光による
局所応力評価に
新たな道を付けた

先端歪計測(局所歪計測)技術のまとめ

Area of Interest	Measurement Method	Sensitivity*		Measurement Area	Note
		Stress	Strain		
Transistor Level 	① - CBED (TEM)	20 MPa	0.02%	10 nm	Destructive
	② - SAD/NBD (TEM)	100 MPa	0.1%	10 nm	Destructive
	- EBSD (SEM)	?	?	40 nm	Non-Destructive
	- TERS (Raman)	10 MPa	0.01%	< 50 nm	Non-Destructive
Micro-Area Level 	③ - Confocal Raman	10 MPa	0.01%	~ 150 nm	Non-Destructive
	- XRD	10 MPa	0.01%	100 μ m	Non-Destructive
	- Photo reflectance Spectroscopy	< 20 MPa	< 0.02%	1 μ m	Non-Destructive
	* 数値に関しては諸説あり				

- 電子線技術①、②による局所歪評価技術の進歩と、シミュレーションを併用したラマン分光応用技術③の進化を確認
- 依然、非破壊でトランジスタレベル(<20nm)の領域を評価できる手法は見当たらない

WG14活動 先端計測技術動向調査

- 3D計測技術の最新動向
- 歪計測技術
- 先端X線技術
 - 超高精度X線ミラー技術(東京大学 三村秀和先生)
 - インラインX線計測向け高輝度X線源

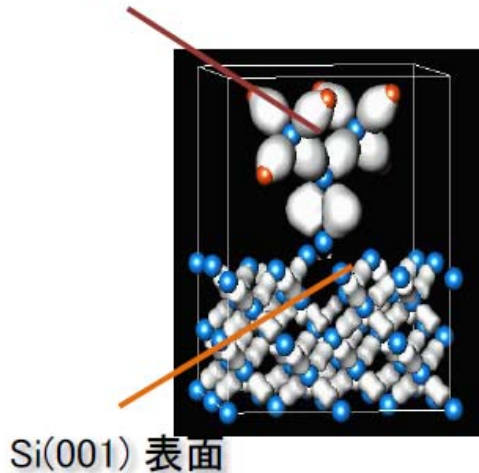
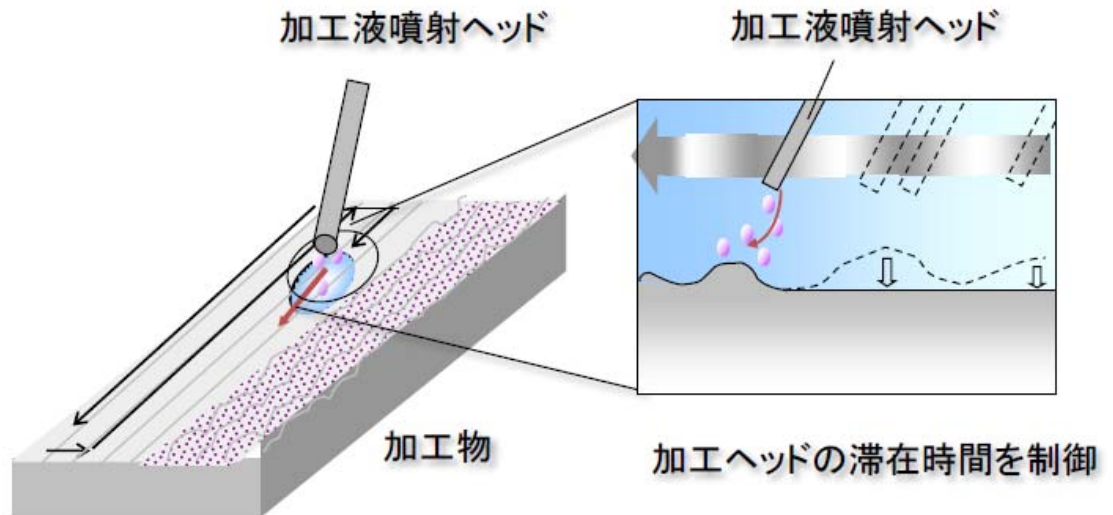
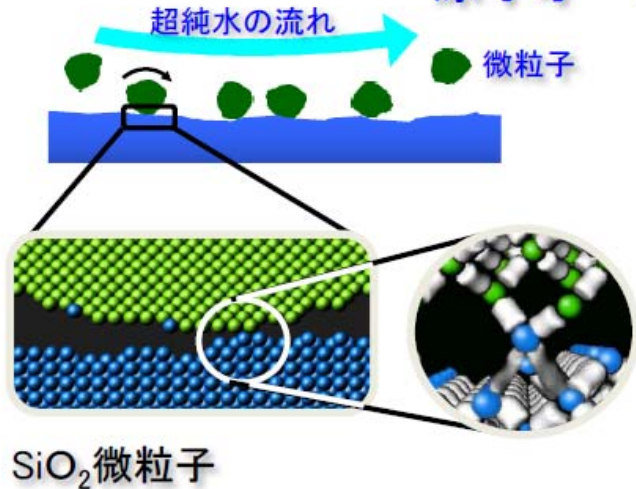
Elastic Emission Machiningによるナノ精度加工法

東京大学 三村秀和先生

加工物と微粒子の表面間の化学反応に基づく加工法

EEM (Elastic Emission Machining)

原子オーダーの除去量を実現

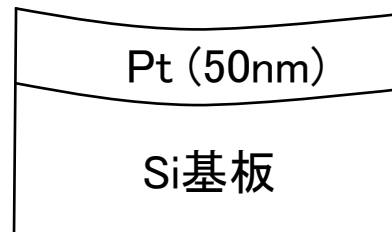
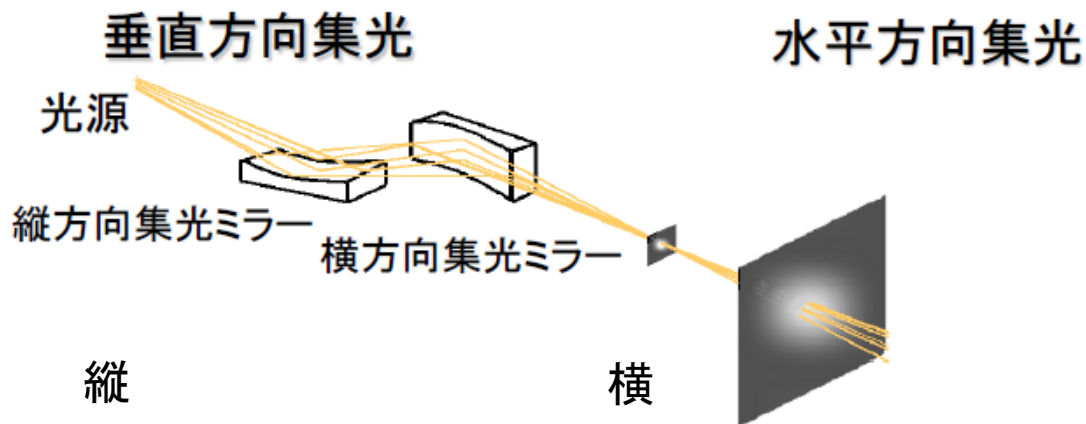


$$\begin{matrix} \text{必要加工量} \\ h(x,y) \end{matrix} = \begin{matrix} \text{スポット加工痕} \\ f(x,y) \end{matrix} \otimes \begin{matrix} \text{滞在時間分布} \\ g(x,y) \end{matrix}$$

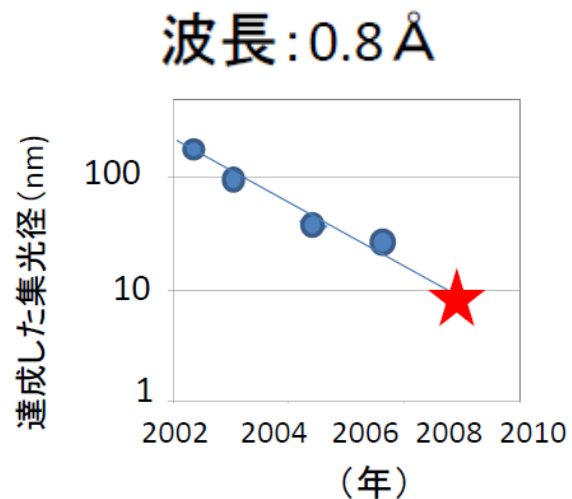
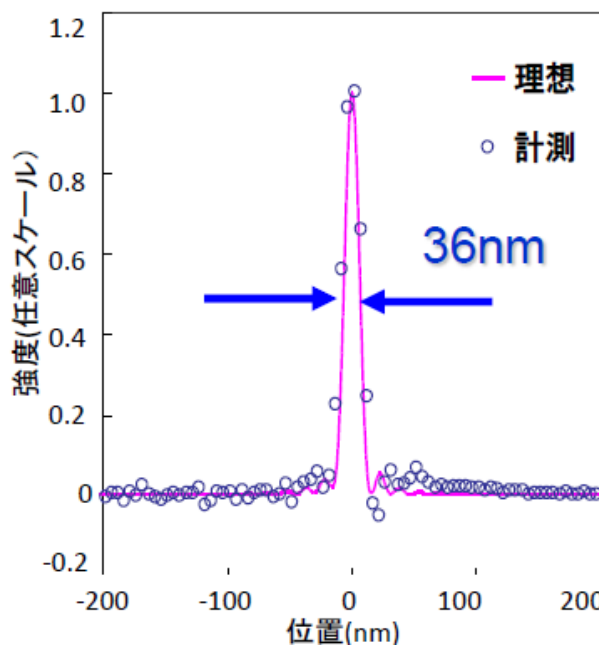
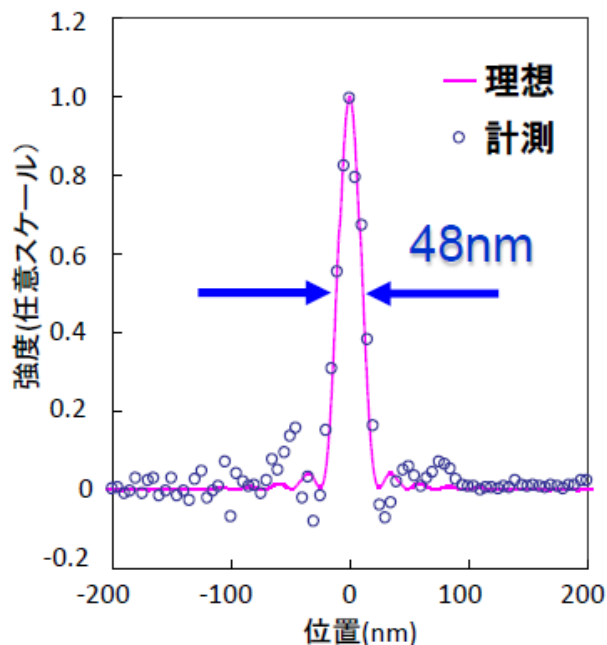
形状修正加工

第一原理シミュレーション

放射光硬X線のナノビーム形成技術

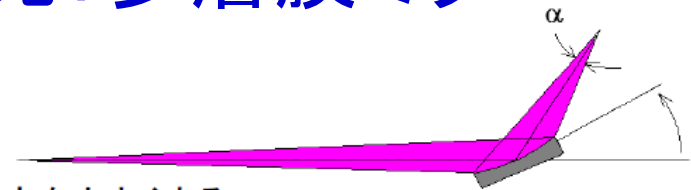


単層ミラー形状



全反射ミラーにより、硬X線集光において理想的な回折限界集光を実現

放射光硬X線のsub 10nm集光：多層膜ミラー

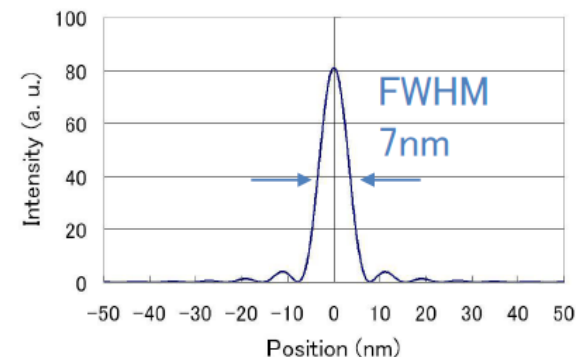
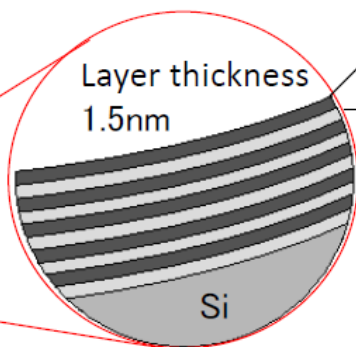
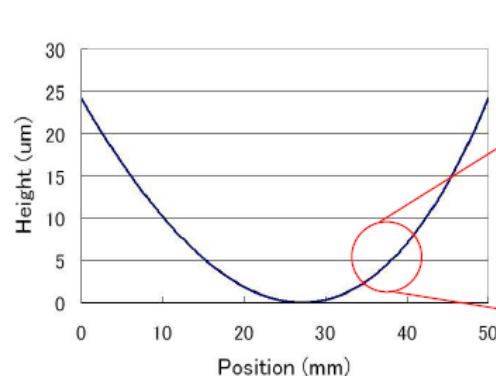


δ : 集光ビームサイズ

$$\delta = 0.5\lambda / NA \quad (NA \doteq \sin(\alpha/2))$$

入射角度を大きくする

$\Rightarrow$ NA (Numerical Aperture) を大きくすることが可能



入射角度: 7mrad, ミラー長: 80mm, X線波長: 0.6 Å

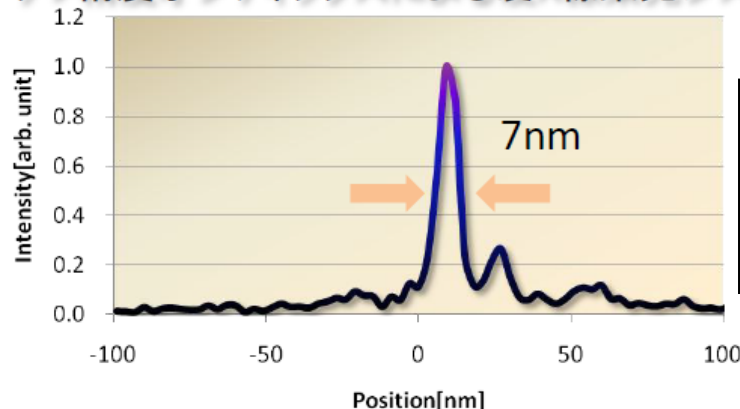
ナノ精度オプティクスによる硬X線集光システム

Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing

Hidekazu Mimura^{1*}, Soichiro Handa¹, Takashi Kimura¹, Hirokatsu Yumoto², Daisuke Yamakawa¹, Hikaru Yokoyama¹, Satoshi Matsuyama¹, Kouji Inagaki¹, Kazuya Yamamura³, Yasuhisa Sano¹,

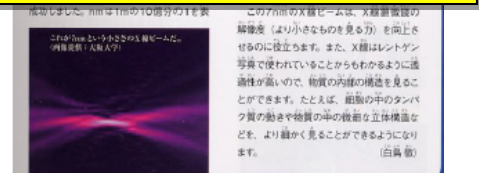
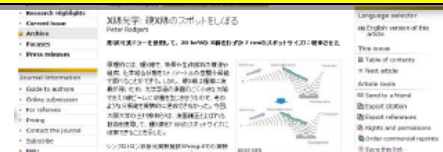
多層膜ミラーによるナノビーム形成

- High NA化可能・・・局所分析, 計測
- Hard Xrayでの大臨界角・・・半導体適用



Sub-10nm硬X線ビームの強度プロファイル

Work in Progress - Do not publish



WG14活動 先端計測技術動向調査

- 3D計測技術の最新動向
- 歪計測技術
- 先端X線技術
 - 高精度ミラー加工技術
 - インラインX線計測向け高輝度X線源
 - CD-SAXS, 回転陰極型X線源・・・リガク 表和彦様
 - MIRRORCLE・・・立命館大学 山田廣成先生

インラインX線形状計測 (CD-SAXS)

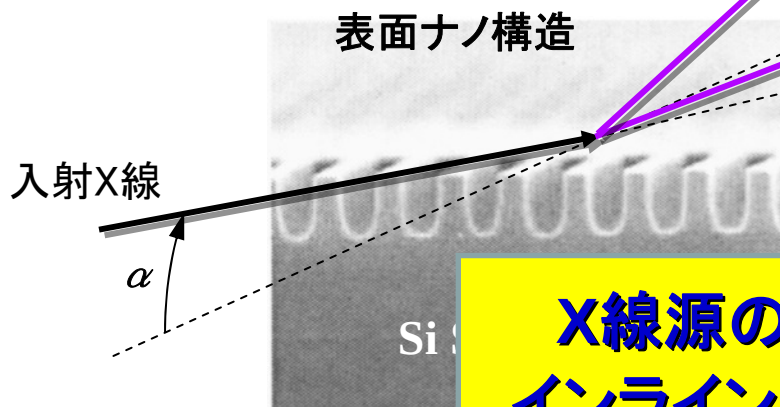
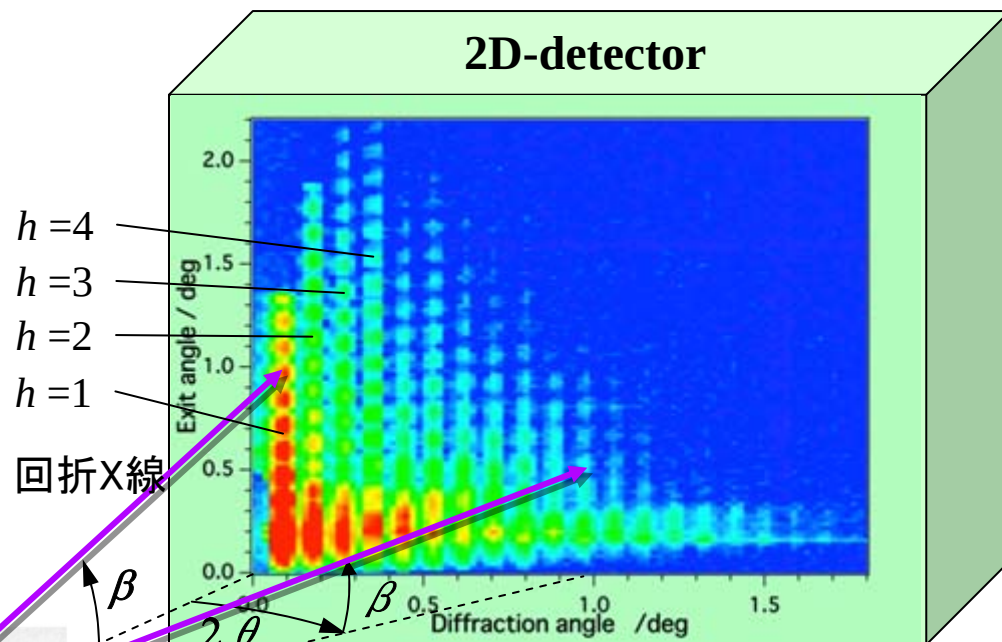
-Grazing Incident Small Angle Xray Scattering (GI-SAXS)の例-

リガク 表和彦様

X線を試料表面に低角度で入射し、試料表面の周期構造によって回折されるX線を二次元検出器で測定する

得られた二次元回折パターンはデバイス断面の二次元構造を反映している

測定時間 < 100 sec @full beam size



$$\text{回折条件: } 2d \sin \theta = h \cdot \lambda$$

d : Period of the unit structure

θ : Half of diffraction angle 2θ

λ : Wavelength of the x-ray

h : Index of diffraction (integer)

**X線源の高輝度化は
インライン計測には必須**

断面形
状

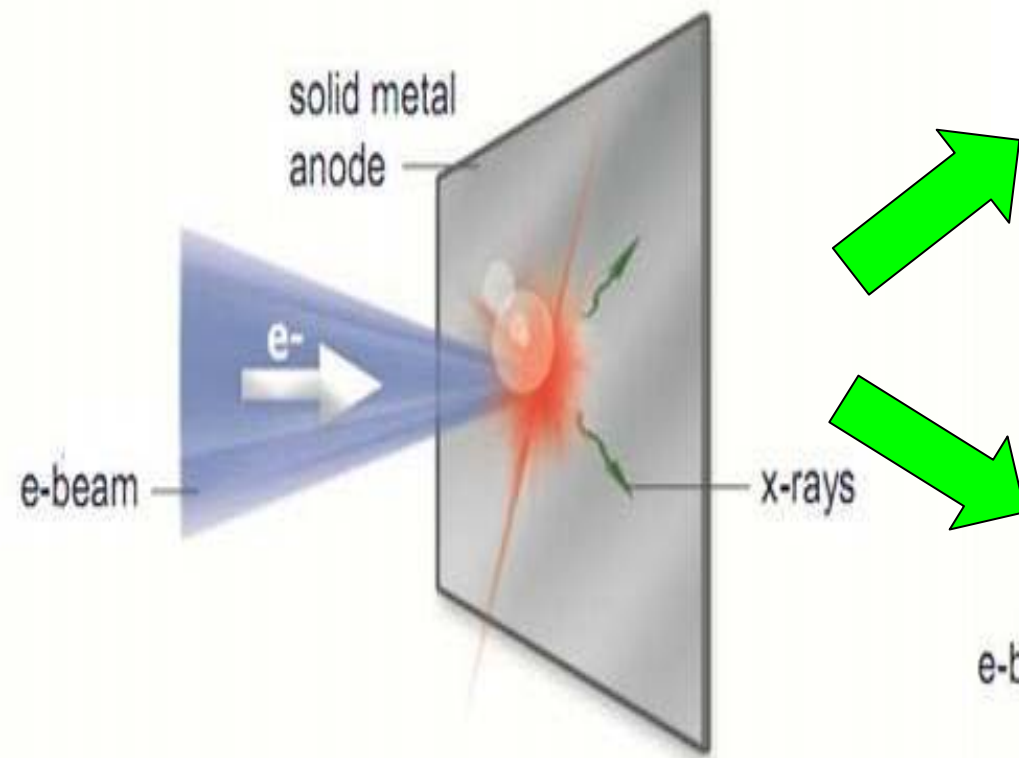
Rigaku Confidential

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 7, 2014, WG14 Metrology

高輝度X線源への取り組み

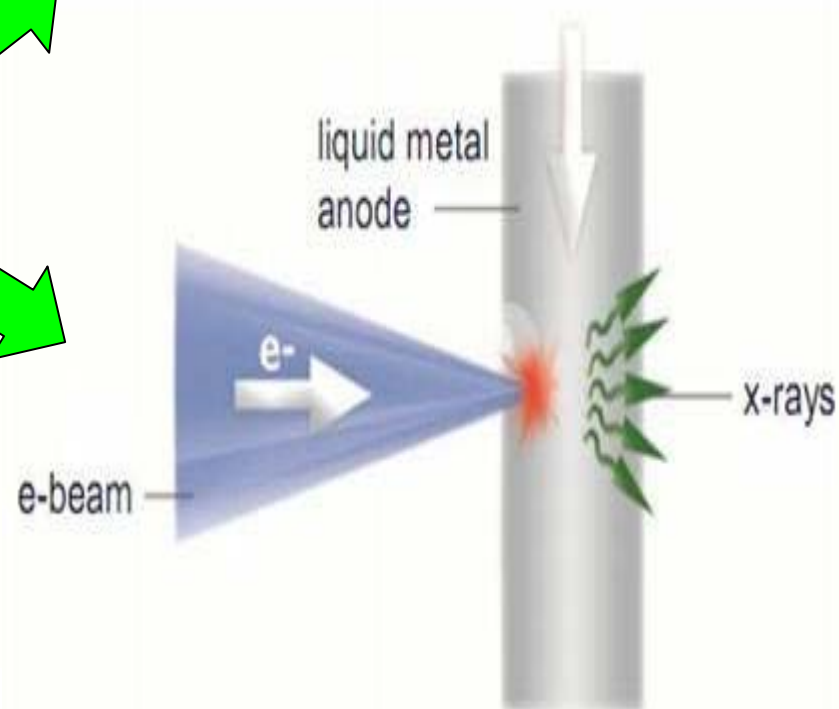
-回転陰極，液体金属ジェットによる発熱対策-



通常のX線源（固体陽極）

-発熱が高輝度化を律束-

回転対陰極



液体金属ジェット陰極

高輝度X線源への取り組み

-蓄積リング+ μ ターゲット制動放射の応用-

立命館大学 山田廣成先生

SOR

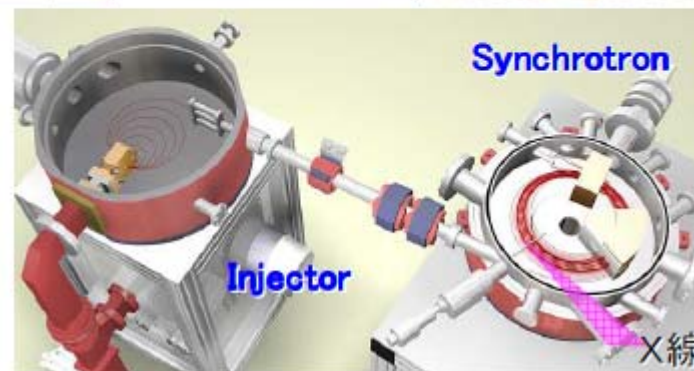


磁場で電子を曲げる制動放射光

↓
大規模

“MIRRORCLE RAY”

(株)光子発生技術研究所(日)



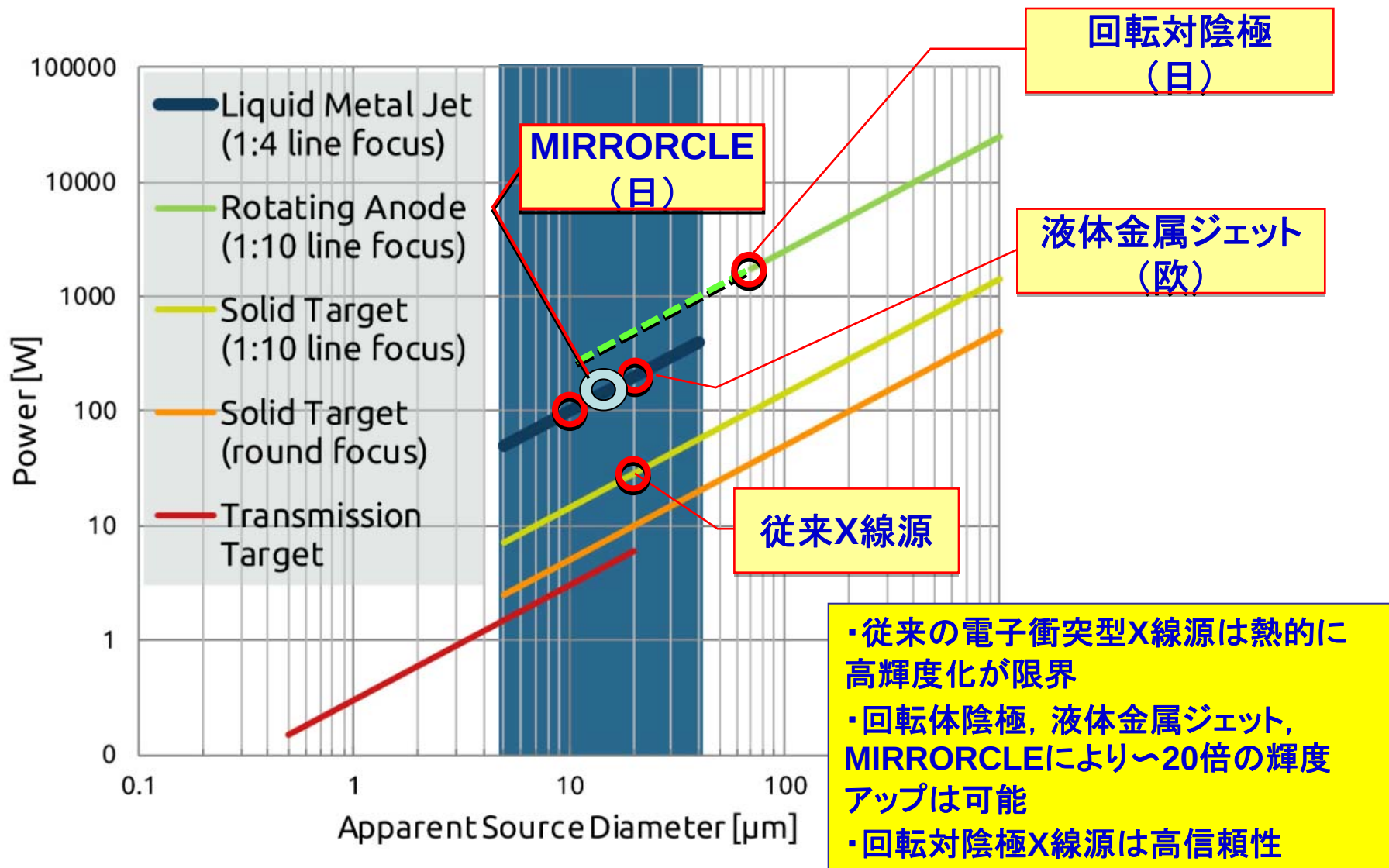
ターゲットのクーロン力による制動放射光

↓
小型化が可能 (卓上X線源)

電子線1MeV $\Rightarrow$ Cu膜厚 0.1mm
X線 100~300keV

ラボX線源の高輝度化ロードマップ

-高スループット化へのチャレンジ-



<http://www.excillum.com/Technology/metal-jet-technology.html>

Work in Progress - Do not publish

STRJ WS: March 7, 2014, WG14 Metrology 38

内容

- 2013年度STRJ WG14 活動報告
 - ITRS Metrology国際活動
 - 国際会議動向
 - WG14 国内活動
 - 2013年度活動方針
 - 先端計測技術動向調査
 - 3次元計測技術
 - 歪計測技術の最先端
 - X線技術
- 2013年度故障解析SWG活動報告

故障解析SWG 2013年度活動報告

サブリーダー
二川 清(金沢工大)

故障解析SWGメンバー(2014/2/18現在)

故障解析SWGメンバー一覧: 2014-2-18現在					
役 職	氏名	所属名	役 職	氏名	所属名
リーダー	益子 洋治	大分大学	特別委員	渡辺 雄一	三洋半導体(株)
サブリーダー	二川 清	金沢工業大学	"	小川 真一	産業技術総合研究所
委員	長谷川 芳樹	富士通セミコンダクター(株)	"	中島 蕃	デバイス・アナリシス(株)
"	和田 慎一	ルネサスエレクトロニクス(株)	"	八坂 行人	(株)日立ハイテクサイエンス
"	中西 伸登	ルネサスエレクトロニクス(株)	"	三井 泰裕	(株)真空デバイス
"	則松 研二	(株)東芝	"	二村 和孝	(株)日立ハイテクノロジーズ
"	稲垣 亮介	ローム(株)	"	寺田 浩敏	浜松ホトニクス(株)
特別委員(大学)	中前 幸治	大阪大学	"	須賀 三雄	日本電子(株)
"	眞田 克	高知工科大学	"	橋本 秀樹	(株)東レリサーチセンター
"	上野 和良	芝浦工業大学	"	杉江 隆一	(株)東レリサーチセンター
合計人数			20		

故障解析SWGでの討議内容と講師一覧



第52回 日時:2013年4月12日(金)13:30~17:00

- 1: 田中 弘治(アストロン) 二川 清(金沢工大)
「故障解析関連データ標準化の現状と今後の進め方」
- 2: 高見澤 悠(東北大学)
「3DAPの半導体への応用の現状と最新の成果」
- 3: 今野 允(日立HI)
「30 kV STEM を用いた MOS 界面の高コントラスト観察」

第54回 日時:2013年11月1日(金)13:30~17:00

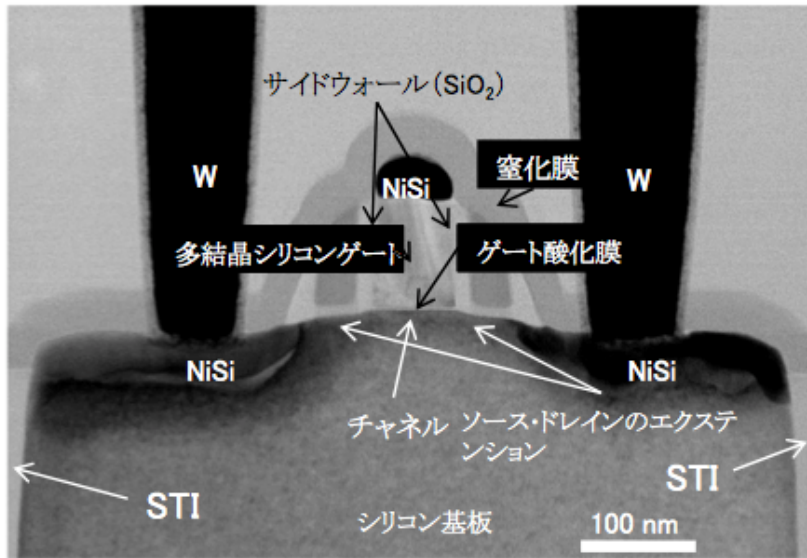
- 1: 工藤 修一(ルネサスエレクトロニクス)
「球面収差補正STEMおよびアトムプローブを用いたHf添加ゲート絶縁膜のTDDB劣化メカニズム解明」
- 2: 謝 詠芬(MA-tek)
「Current status of analysis technology in Taiwan and advanced analytical results」
- 3: 三村秀和(東京大学)
「超高精度ミラーによるX線ナノビーム形成」

第53回 日時:2013年7月13日(金)13:30~17:00

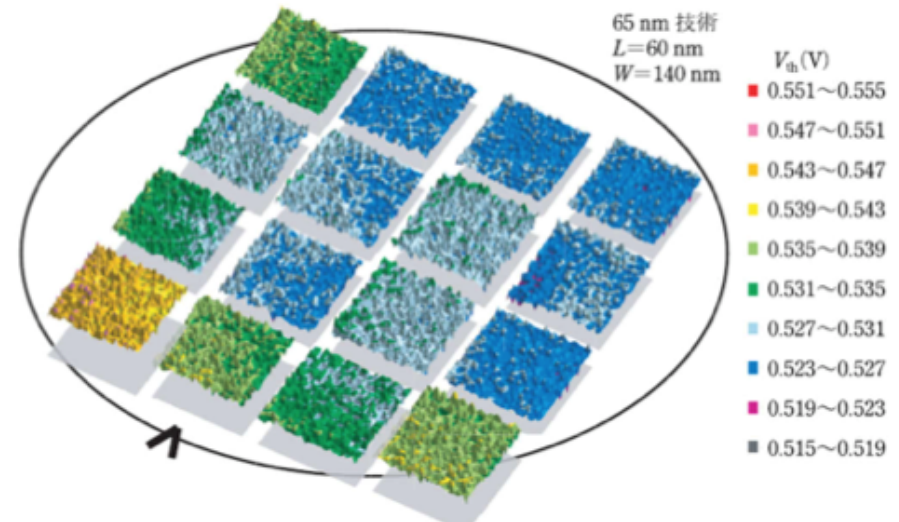
- 1: 三田 吉郎(東大)
「東京大学武田先端知クリーンルームへのお誘い」
- 2: 中島 蕃(デバイス・アナリシス)
「磁界プローブのnTレベル高感度化」
- 3: Antonio Orozco(Neocera)
「Advanced Magnetic Field Imaging for non-destructive Fault Isolation」

第55回 日時:2014年2月7日(金)13:30~17:00

- 1: 松本 徹(浜松ホトニクス)
「微小電界センサによるIGBTの無バイアス観察」
- 2: 後藤 安則(トヨタ自動車)
「レーザテラヘルツエミッション顕微鏡法を用いたIGBT不純物欠陥の観察」
- 3: 中村 共則(浜松ホトニクス)
「多光子OBICによるパワーデバイスの脆弱個所の解析」



65 nm ノードのMOSトランジスタの断面TEM像



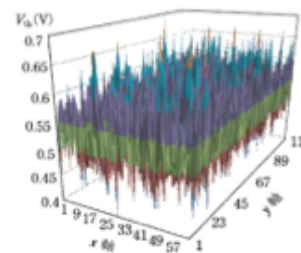
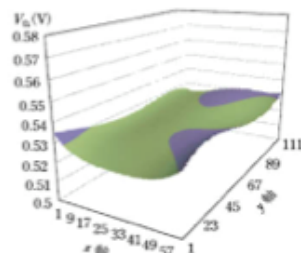
ウエハ内のトランジスタのしきい値電圧分布

T. Tsunomura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 124505 (2009).

チップ内トランジスタ(8192 個)の
しきい値電圧ばらつき

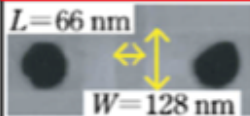
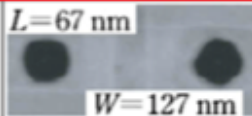
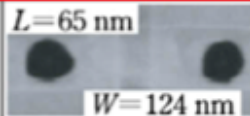
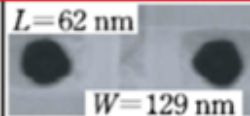
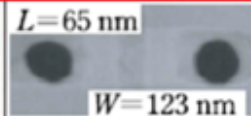
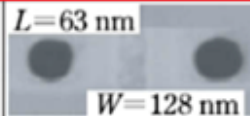
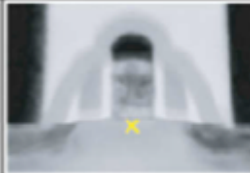
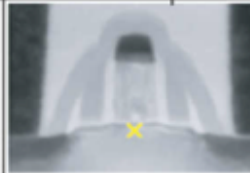
システムティック成分

ランダム成分(支配的)



平本俊郎, "ロバストトランジスタ技術," 半導体MIRAIプロジェクト成果報告会(2007).

しきい値電圧のばらつき

MOS タイプ	nMOS (W/L=140/60 nm)			pMOS (W/L=140/60 nm)		
V_{th}	0.335V (-5σ)	0.529V (中央)	0.719V ($+5\sigma$)	0.425V (-5σ)	0.546V (中央)	0.683V ($+5\sigma$)
平面 TEM 像						
断面 TEM 像						
T_{ox}	1.9 nm	1.9 nm	1.9 nm	1.9 nm	1.9 nm	1.9 nm
ひずみ量	130/-130 MPa	130/130 MPa	130/130 MPa	0/-260 MPa	130/-130 MPa	0/-260 MPa
多結晶シリコンゲートの粒の TEM 像						

TEM像と電子線ホログラフィーによる分析結果

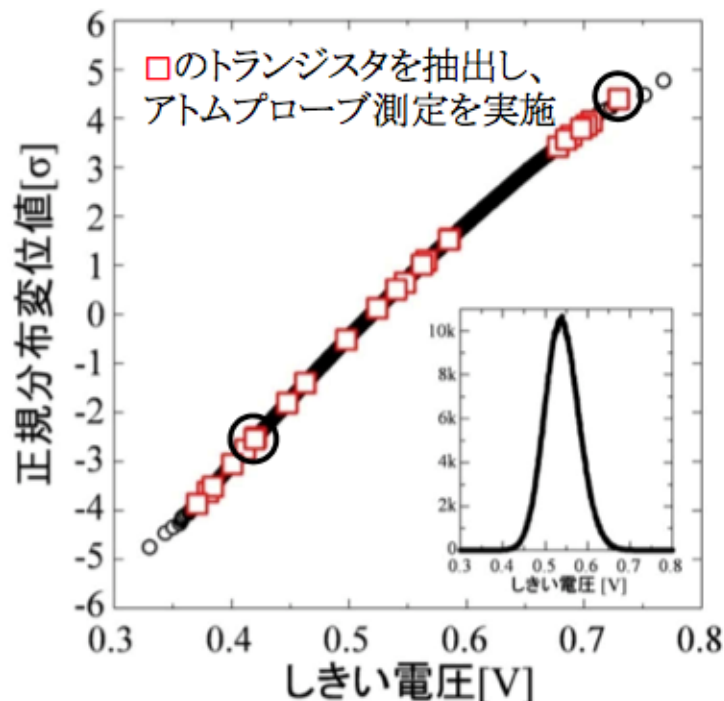
T. Tsunomura et al., VLSI Symp. Tech. Dig. **16**, 156 (2008).

しきい値電圧 (V_{th}) の大きく異なるトランジスタでも、サイズ、ゲート酸化膜厚、ひずみ量、多結晶シリコンゲートの粒径分布に明瞭な差は見られない。

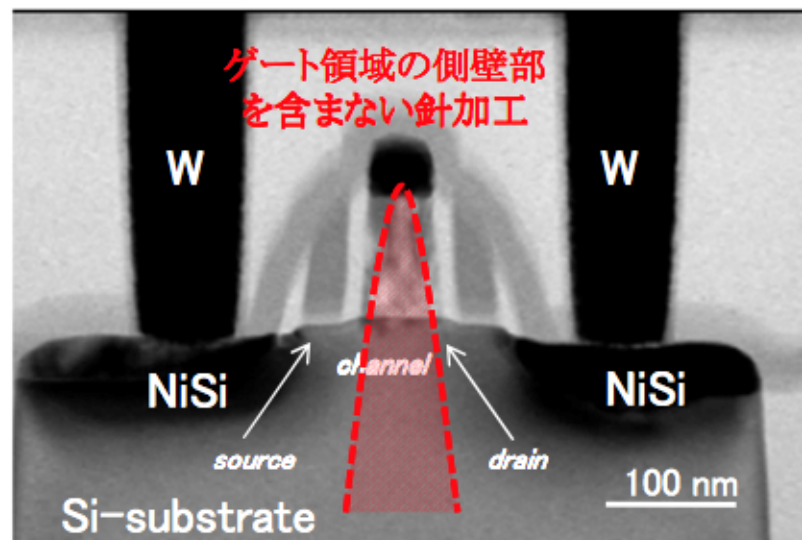
→ ランダムなしきい値電圧ばらつきを引き起こす原因は、他の要因が支配的

MOSトランジスタ構造中の実際のドーパント分布を原子レベルの空間分解能で観察し、理解することが強く求められる

実トランジスタの3DAP分析



n 型MOSトランジスタ (1024x1024) におけるしきい電圧のばらつき



H. Takamizawa et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 253504 (2012).

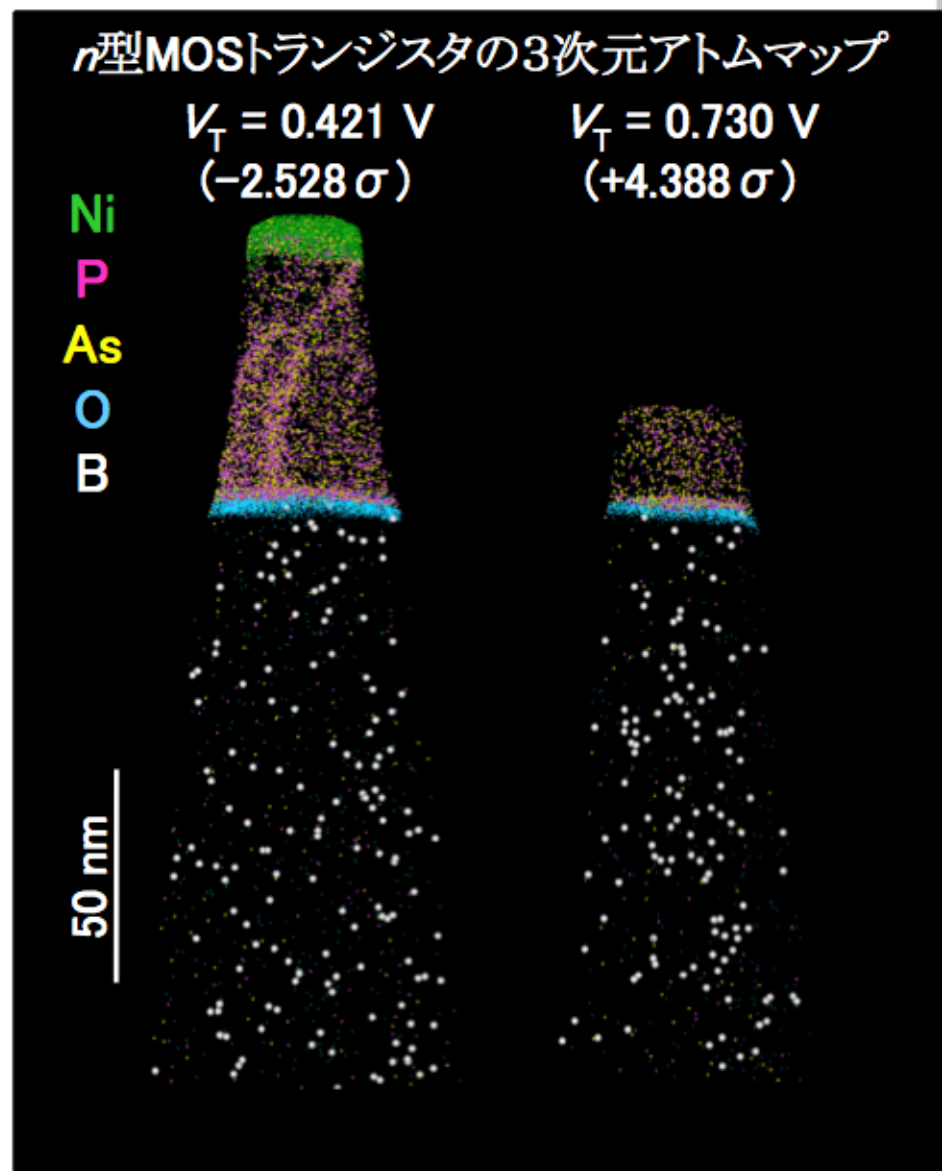
n 型MOSトランジスタの3次元アトムマップ

$V_T = 0.421 \text{ V}$
(-2.528σ)

$V_T = 0.730 \text{ V}$
($+4.388 \sigma$)

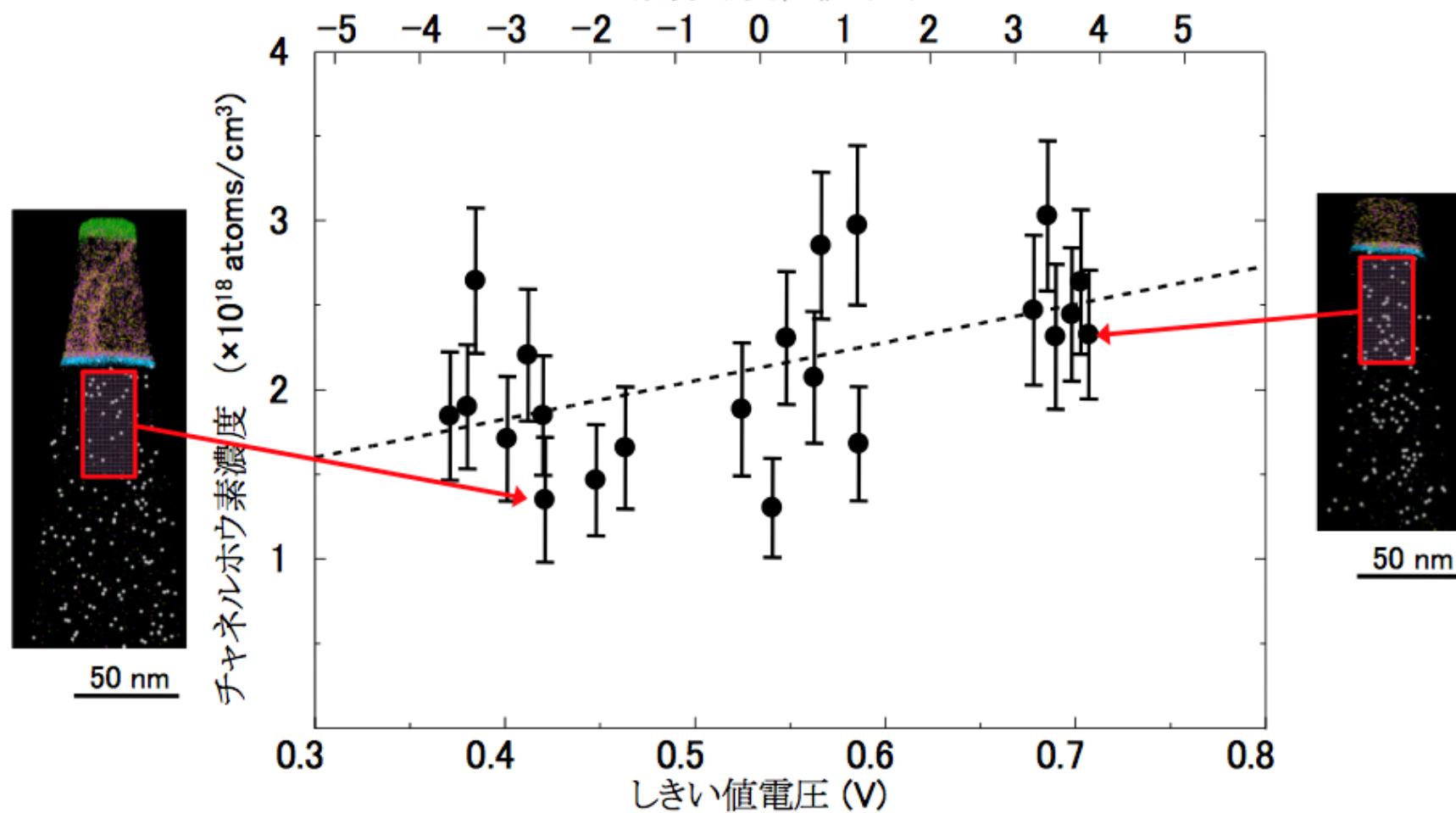
Ni
P
As
O
B

50 nm



ゲート酸化膜直下50 nmの領域におけるチャネルドーパント濃度としきい値電圧の関係

正規分布変位値 (σ)



- ・しきい値電圧とチャネルドーパント濃度に正の相関
- ・同程度のしきい値電圧にかかわらず、濃度が異なるトランジスタが存在

3次元アトムプローブの故障解析への応用の現状



- 故障解析への応用は既に多いに活用されている
- 日本では半導体デバイスへの応用が先行している
- 狭義の故障解析(たった一つしか無いサンプルの故障解析)への応用はまだ目途がたっていない
 - 高電圧引加による解析中のサンプルの破壊
 - 原子の捕獲確率が60%に留まる(検出器の有効捕獲面積に律速)