

# 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)

2015年3月6日

WG14 ソニー(株) 瀬島幸一

# 内容

- 2014年度STRJ WG14 活動報告
  - ITRS Metrology 国際活動
  - WG14 国内活動
    - 先端計測技術動向調査
      - Spin 関連計測技術
      - 先端元素分布評価技術
- 2014年度故障解析 S W G 活動報告

# 2014年度STRJ WG14活動報告

## メンバー

瀬島幸一	(ソニー)
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)
浅野 昌史	(東芝)
市川昌和	(東京大学)
水野文夫	(明星大学)
清水 康雄	(東北大学)
新井 優	(産総研)
西萩一夫	(堀場製作所)
船橋 孝典	(東レエンジニアリング)
山崎裕一郎	(NGR)
堺澤秀行	(NGR)

# 内容

- **2014年度STRJ WG14 活動報告**
  - ITRS Metrology国際活動
  - WG14 国内活動
    - 先端計測技術動向調査
      - Spin関連計測技術
      - 先端元素分布評価技術
- 2014年度故障解析 S W G 活動報告

- ◆ ITRS 2.0においてMetrologyはMore Mooreチームの一員となった
- ◆ White PaperではMore Mooreに限らず技術課題を提示

## ITRS 2.0 Metrology White Paper

### KEY CHALLENGES

- Starting materials metrology and manufacturing metrology are impacted by the introduction of **new substrates** based on **SOI, III-V, GeOI, etc** (especially particles) at levels of interest for metrology tools are needed.
- Measurement of **Directed Self Assembly (DSA)** and **3D profiles** are not ready for their rapid introduction. **Non-destructive**, production worthy wafer and mask-level metrology for **CD measurement for 3D structures, overlay, defect detection, and analysis** are needed.
- Structural and elemental **analysis at device dimensions** and measurements for beyond CMOS, and emerging materials and devices.
- Determination of manufacturing metrology when device and interconnect technology remain undefined.

ITRS 2.0 Metrology White Paperのトピックス！  
・新構造基板...SOI /III-V, GeOI, etc  
・Directed Self Assembly (DSA)...3Dプロファイル, 欠陥  
・非破壊での3Dデバイス構造の計測

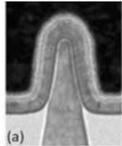
- ◆ Interconnect と FEP TWGsと共同で更なるメトロロジー課題の抽出を要請

## Metrology for 3D Transistors and Memory

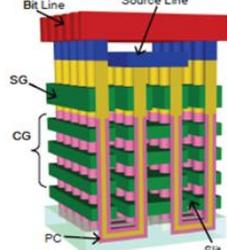
EOT & Defects for New Channel Materials for high  $\mu$



CD/Sidewall/Height/Stress/Dopant Metrology for 3D Devices

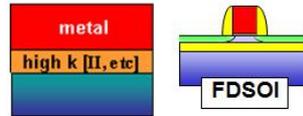


3D Metrology for Advanced Memory

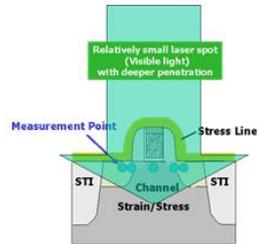


New Memory Materials Phase Change Memory

Metrology for Next Generation Metal Gate/High k stacks

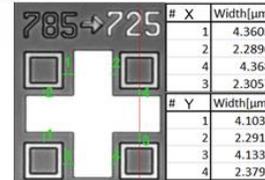


Nano-topography & Local Stress measurements

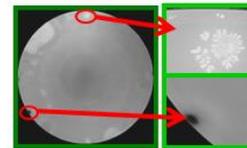


## Metrology for 3D Interconnect

Overlay Through Silicon Substrate – IR Microscopy

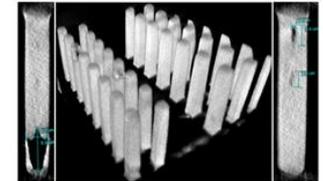


Bonding Defects – SAM Scanning Acoustic Microscopy

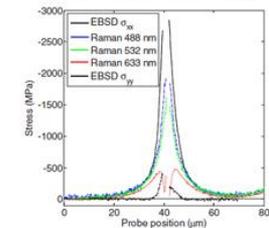


Voids and Delamination

TSV Metrology and Inspection: X-Ray Microscopy



Stress Metrology around TSVs Raman Microscopy



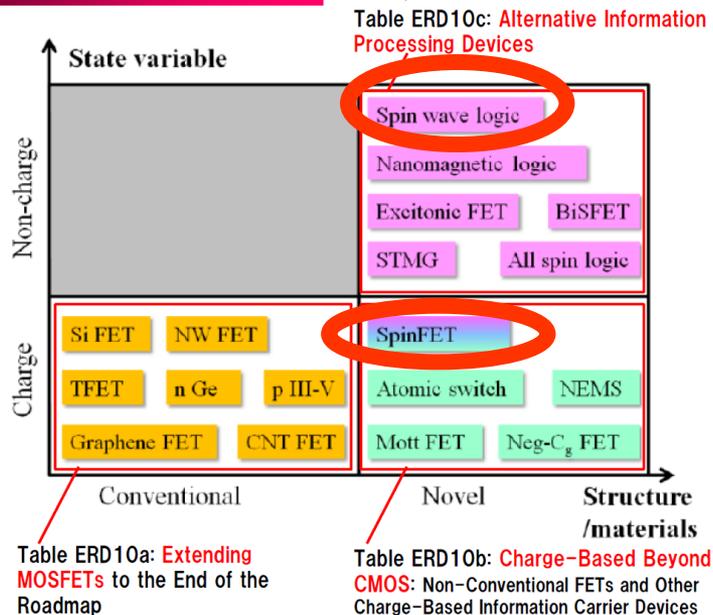
# 内容

- **2014年度STRJ WG14 活動報告**
  - ITRS Metrology 国際活動
  - **WG14 国内活動**
    - 先端計測技術動向調査
      - Spin関連計測技術
      - 先端元素分布評価技術
- 2014年度故障解析 S W G 活動報告

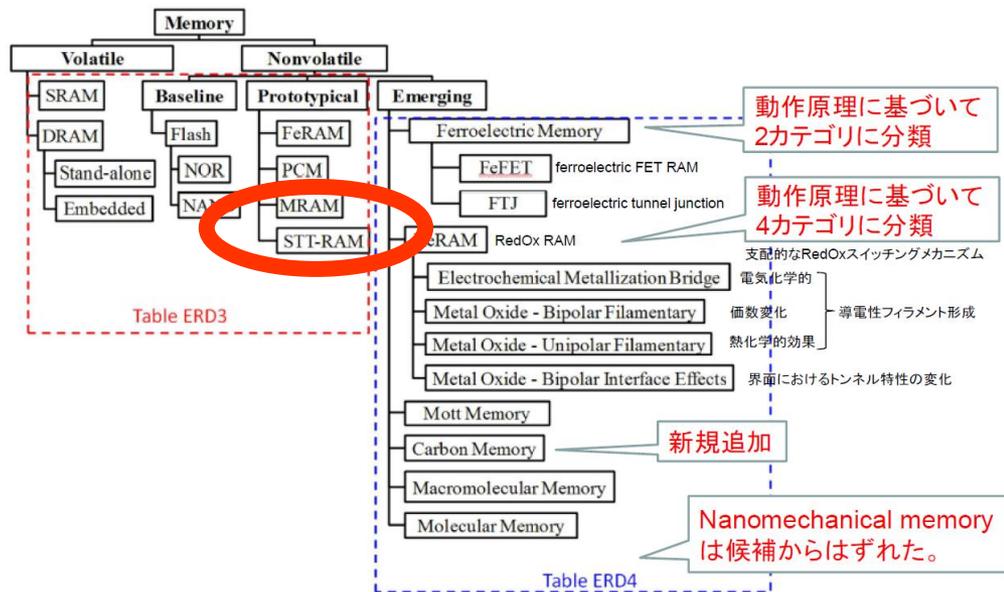
# WG14活動 先端計測技術動向調査

- Spin関連計測技術
- 先端元素分布評価技術
  - STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術
  - 特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術(SS-SSRM)

## 2013 ERD Logic Taxonomy



## 2013 ERD Memory Taxonomy



WG12 (ERD) / WG13 (ERM)からの計測ニーズヒアリングを実施。

スピン関連計測技術のニーズを把握

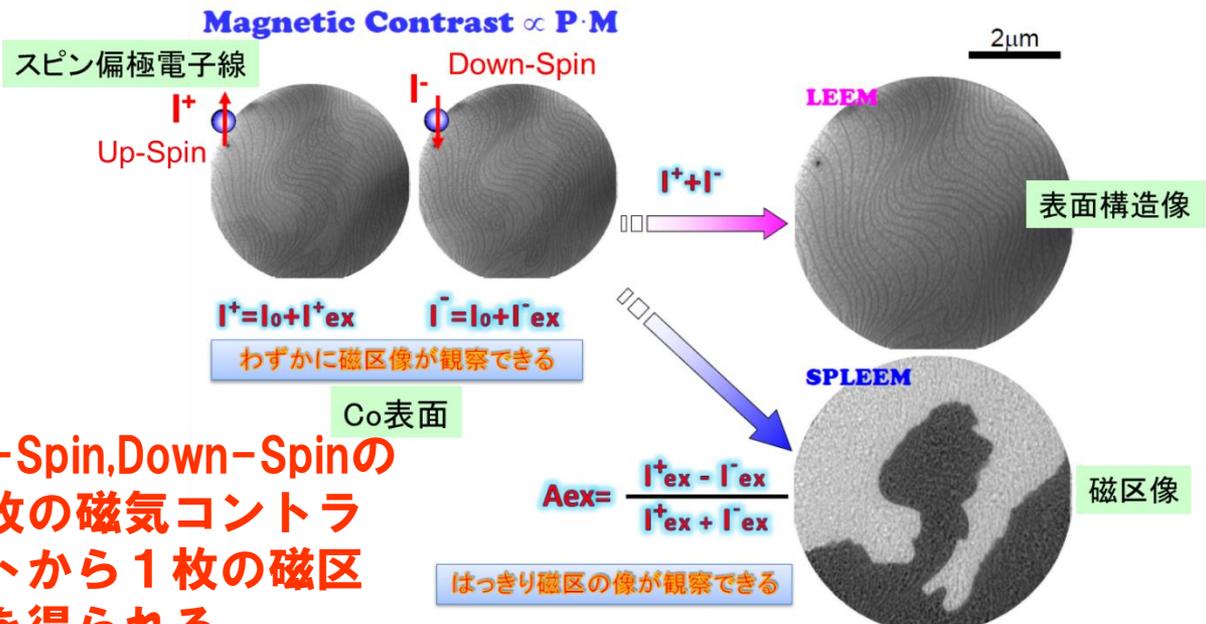
# スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡

大阪電通大：越川先生 G r

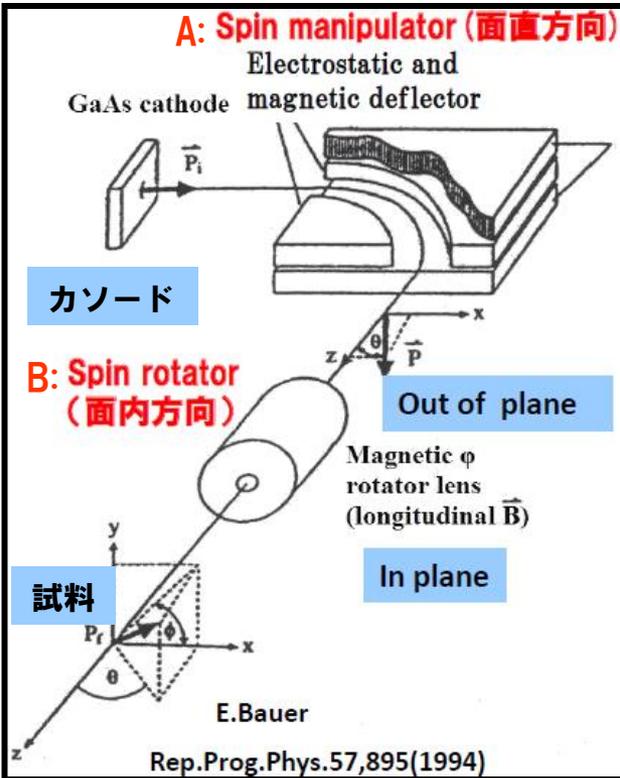
## 2. 電子顕微鏡

- (1) 透過型電子顕微鏡(TEM)
- (2) 走査型電子顕微鏡(SEM)
- (3) 表面電子顕微鏡
  - (a) 反射電子顕微鏡(REM、SREM)
  - (b) 低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)
    - (スピンの偏極低エネルギー電子顕微鏡(SPLEEM))

スピン偏極低エネルギー電子顕微鏡による磁区コントラスト観察の原理

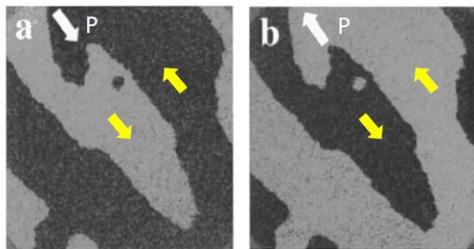


Up-Spin, Down-Spinの  
2枚の磁気コントラ  
ストから1枚の磁区  
像を得られる。

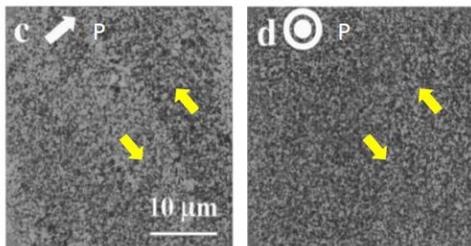


■ SPLEEMの構成図  
AとBで3次元で自由に  
スピン方向を変化できる

# 高輝度スピン偏極電子源の開発



aとb30秒積



cとdビデオレート像

**従来の電子源では実時間での観察は困難**

試料 : **Co / W(110)**

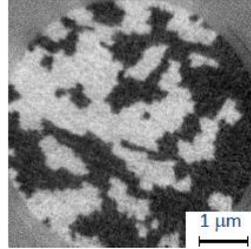
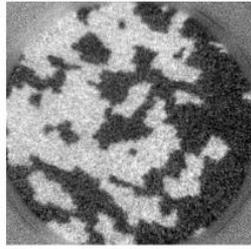
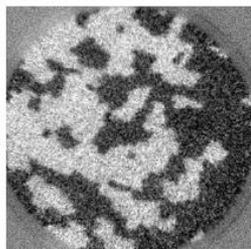
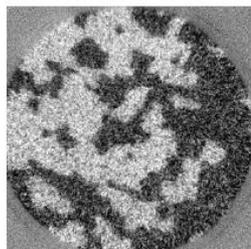
観察時間:

**0.02 秒**

**0.04 秒**

**0.1 秒**

**0.2 秒**



## 新しく開発したスピン偏極電子銃 (市販品との比較)

		従来の市販品	今回の開発品
輝度	レーザ照射法	~ 10 <sup>3</sup> A/cm <sup>2</sup> ·sr	<b>1.3 x 10<sup>7</sup> A/cm<sup>2</sup>·sr *10,000倍以上</b>
	カソード - レンズ間距離	前面照射	<b>背面照射 (新しいカソードの開発)</b>
	カソード - レンズ間距離	~ 70 cm	2mm
度	レーザビーム径	~ 1mm φ	1.3 μm φ
	スピン偏極度	GaAs基板 (~20-25%)	GaAs/GaAsP <b>歪み超格子</b> (~90%) * 3.5~4倍
像取得時間		5~30秒	<b>0.02秒 * 200倍以上 (実時間観察が可能)</b>
カソードの寿命 (電子源)		3~4 時間 (NEA: 負の電子親和力)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 2か月以上 (NEA)</li> <li>* 200~300倍以上 (極高真空と電子光学系の新しい設計)</li> <li>* 2年以上 (カソード)</li> </ul>



スピン偏極電子銃としては世界トップの性能を持つ

**新開発の電子源でビデオレートでの画像取得が可能になった**

# 高輝度スピンドル偏極電子源でのその場観察

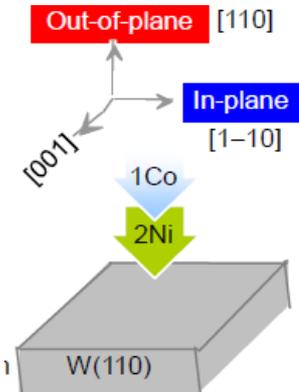


は強い垂直磁化が得られる

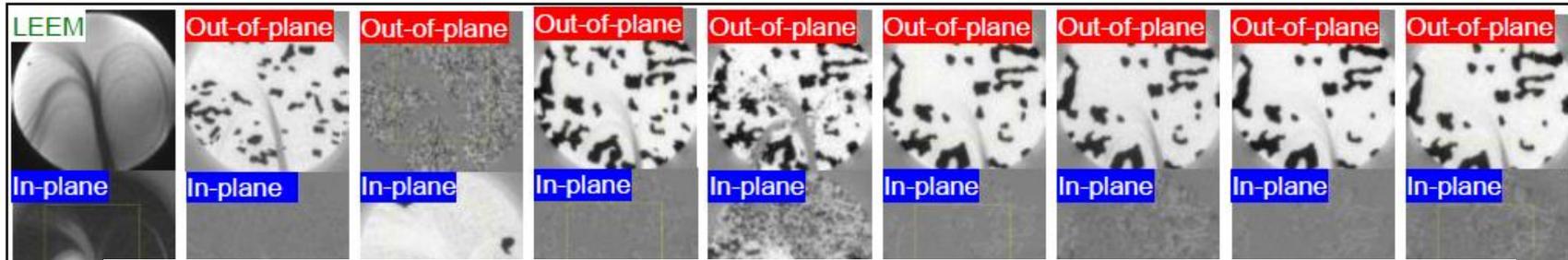
→ 実用薄膜(?)

小野・NECグループ  $[\text{Co}_1 \text{Ni}_3]_x$  多層膜

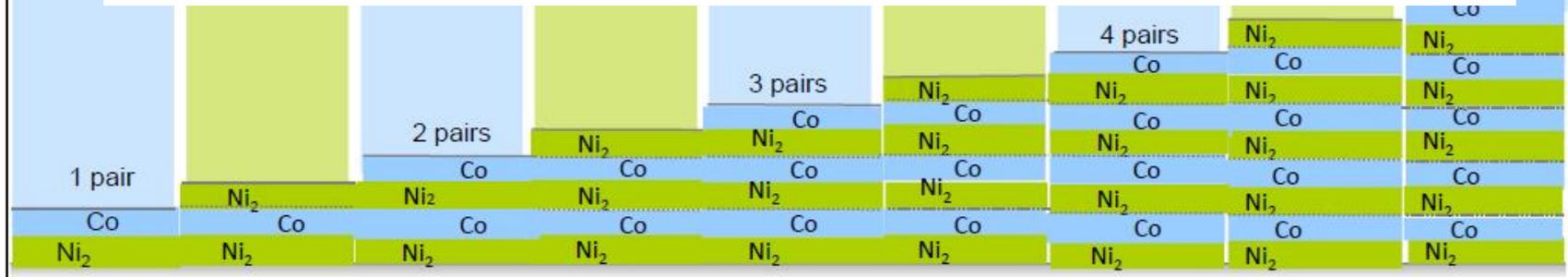
T. Koyama *et al.*, Appl. Phys. Express 1. 101303 (2008)



垂直磁化  
面内磁化



CoNiの多層膜成膜過程を実時間観察した結果、4ペア形成以降は安定した垂直磁化が得られることを確認できた。

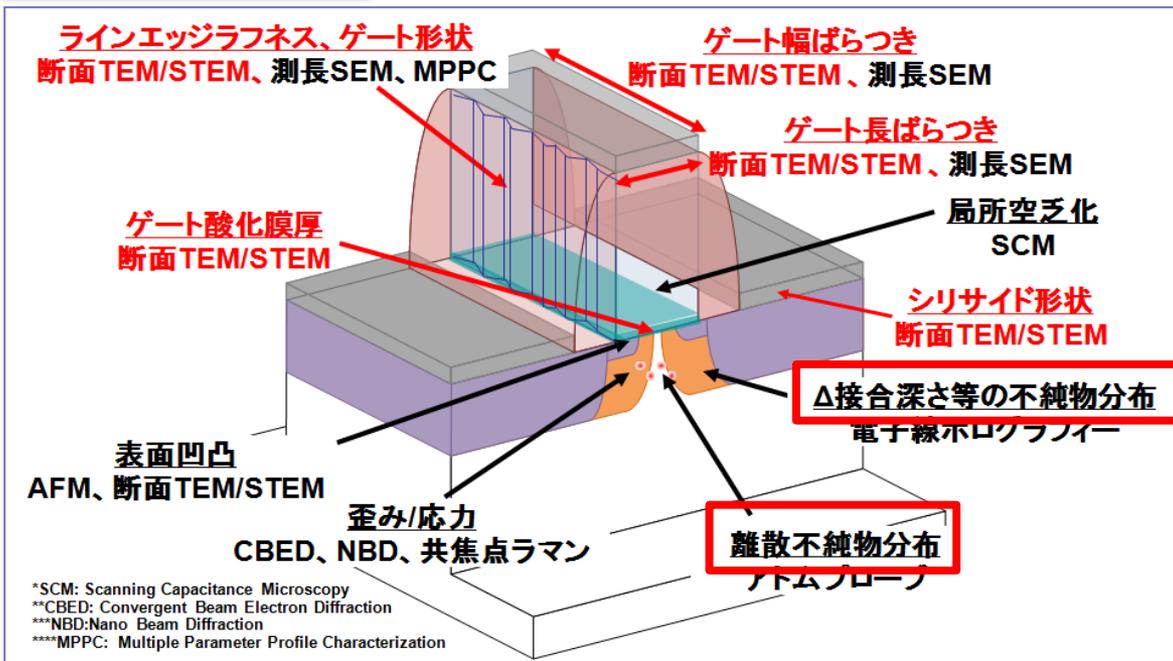


# WG14活動 先端計測技術動向調査

- Spin関連計測技術
- 先端元素分布評価技術
  - STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術
  - 特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術(SS-SSRM)

# 先端元素分布評価技術

トランジスタ性能に影響を及ぼす因子



先端MOSTランジスタでの不純物分布計測技術のニーズ

ドーパント分布の分析手法

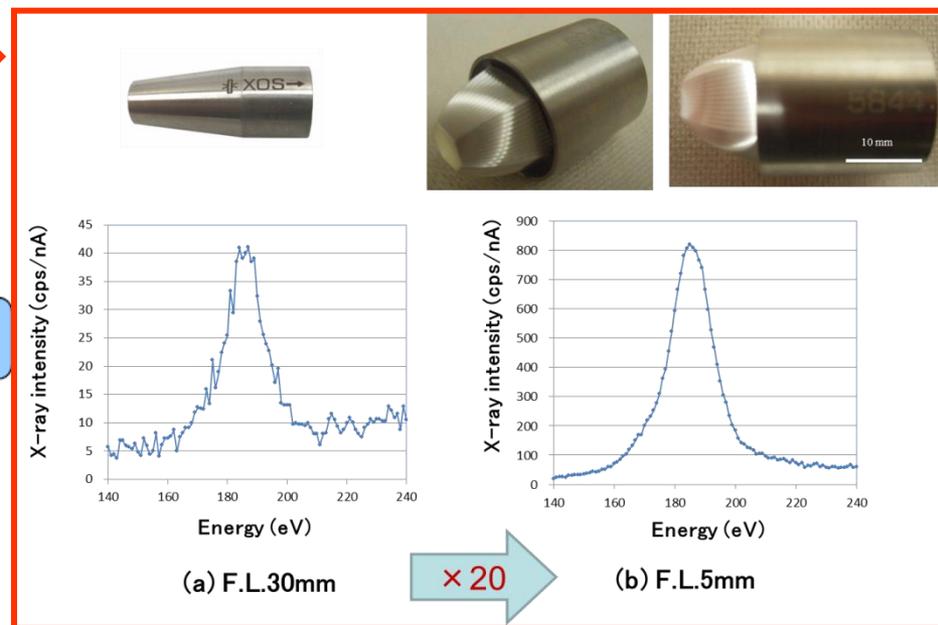
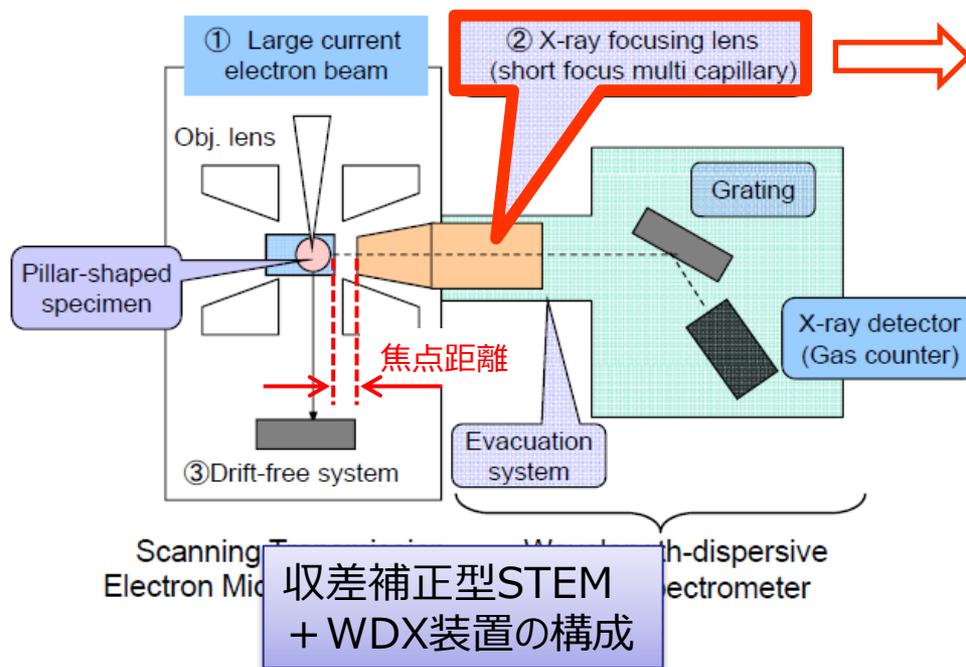
Semiconductor type	Electrical distribution	Elemental distribution
N-type (As)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electron Holography</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analytical Electron Microscope (EDX)</li> <li>SIMS</li> <li>3DAP</li> </ul>
P-type (B)	<ul style="list-style-type: none"> <li>SCM</li> <li>SSRM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analytical Electron Microscope (WDX)</li> <li>SIMS</li> <li>3DAP</li> </ul>

# WG14活動 先端計測技術動向調査

- Spin関連計測技術
- 先端元素分布評価技術
  - STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術
  - 特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術(SS-SSRM)

# STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術

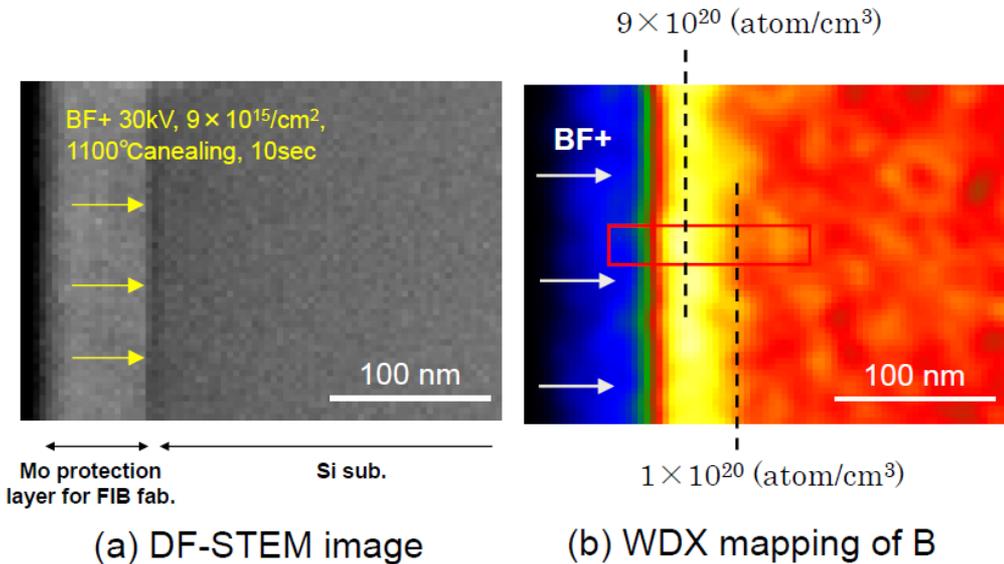
(日立中研/高口様)



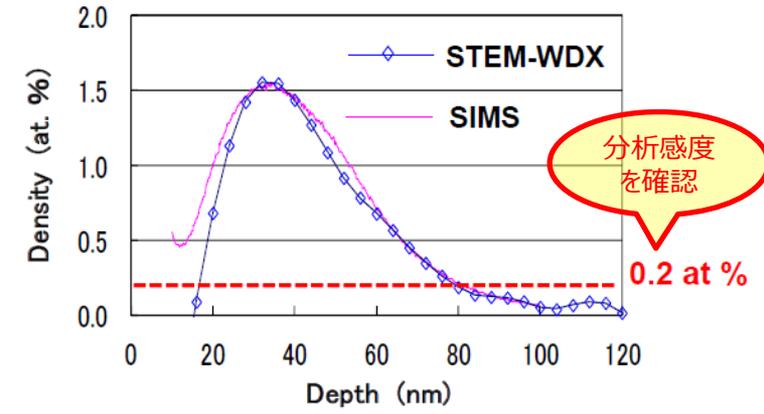
- ① 収差補正型走査型透過電子顕微鏡 (STEM) を使用 (照射ビーム大電流化)
- ② 試料から発生したX線をマルチキャピラリで集光 (B用に最適化) し、WDX (波長分散型X線分光器) で分析
- ③ WDX分析時のドリフト補正を適用

■ キャピラリ型X線集光器の改良によるB分析感度向上。  
 焦点距離30mmの既存品に対し改良型(焦点距離5mm)では感度20倍

# STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術



Si基板中のボロン(B)濃度分布評価結果



Comparison of Depth profiles measured by using WDX and SIMS

Si基板中のボロン(B)濃度分布評価結果 WDXとSIMSの比較

- STEM-WDXによるP型ドーパント分析感度向上策を検討
- 複数の技術の組合せにより従来手法に比べ166k倍の感度向上を達成
- Si中の0.2at%程度のB分布が評価できることを確認

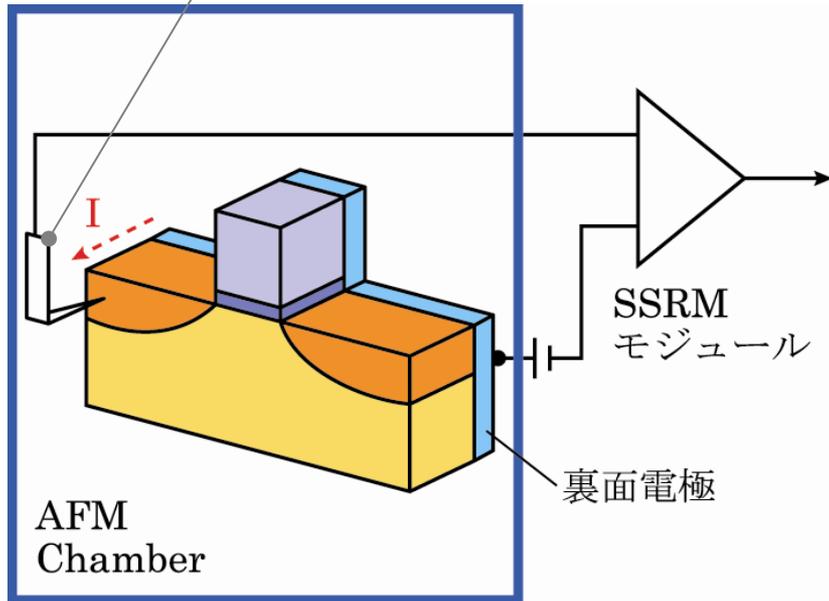
# WG14活動 先端計測技術動向調査

- ERM/ERD計測技術二ーズ
- Spin関連計測技術
- 先端元素分布評価技術
  - STEM-WDXによる軽元素組成分布評価技術
  - 特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術  
(SS-SSRM)

# 世界初：特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術 (SS-SSRM)

(東芝/張様)

Diamond-coated Si probe



真空中SSRM測定原理  
概念図

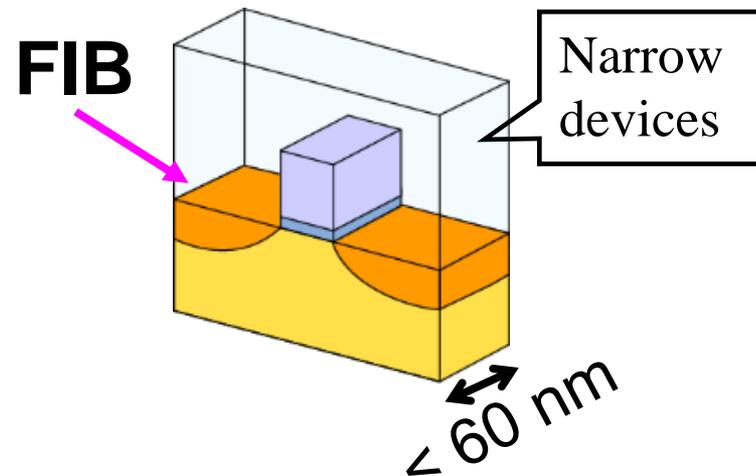
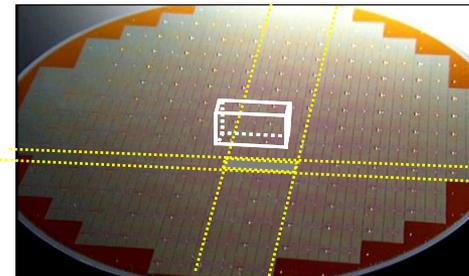
$$R = \rho/4a$$

$$\rho \sim 1/N$$

**SS-SSRM:**  
**Site-Specific Scanning Spreading**  
**Resistance Microscopy**

Work in Progress - Do not publish

特定箇所試料作製法

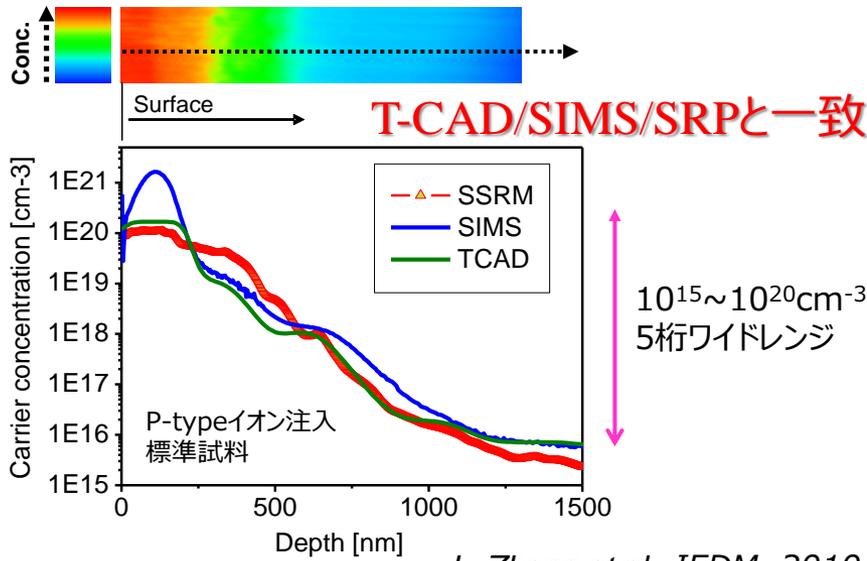


- 特定箇所故障解析
- 微細デバイス任意断面評価

L. Zhang et al., IEDM, 2010

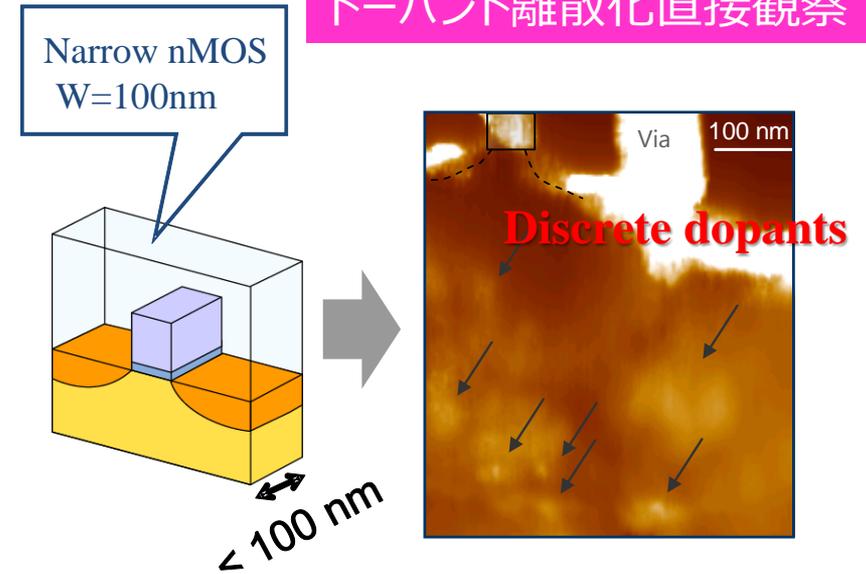
# 特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術 (SS-SRRM) による 高空間分解能・高定量化・高感度キャリア計測

## 濃度定量化



L. Zhang et al., IEDM, 2010

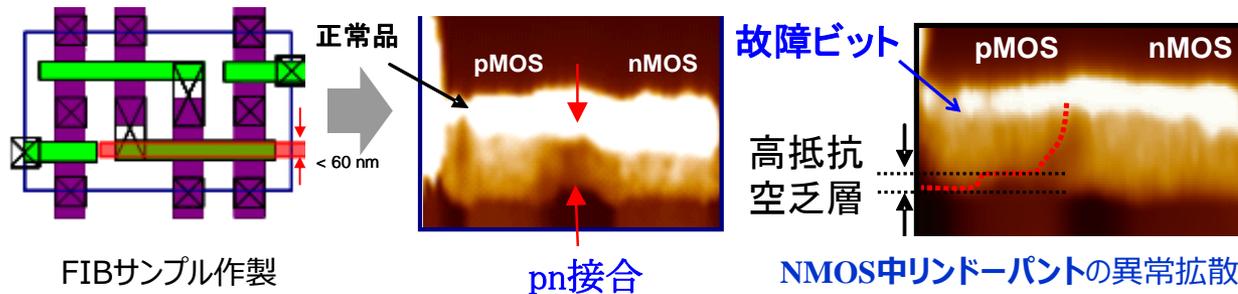
## ドーパント離散化直接観察



L. Zhang et al., IRPS, 2012

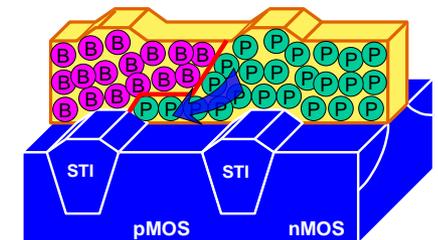
## 故障解析

### 微細SRAMゲート内ドーピング不良解析



L. Zhang et al., IEDM, 2010

### 故障モデル検証



原因究明、プロセス改善、歩留り向上

# 故障解析SWG 2014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 (2014/1/18現在)

## 故障解析SWGメンバー一覧: 2015-1-18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
"	瀬戸屋 孝	(株)東芝	"	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56回 日時:2014年5月16日(金)13:30~17:00

- 1: 馬殿 直樹(東レリサーチセンター)  
「ナノIR法の現状と課題」
- 2: 水尾真理子(ルネサスセミコンダクタエンジニアリング)  
「NiPtシリサイド起因チャンネル応力発生メカニズム」
- 3: 遠藤 幸一(東芝)  
「時間分解エミッション顕微鏡を用いたパワーMOSFETアバランシェ動作の表面からの観測」

第58回 日時:2014年12月12日(金)13:30~17:00

- 1: 叶 際平(日産アーク)  
「原子間力赤外分光法と近接場赤外分光法  
最新技術とその応用」
- 2: 長友 俊信(DCGシステムズ)  
「ロックインサーモグラフィによるパワーデバイス内の  
故障部位深さを特定する方法に関する研究」
- 3: 佐川 雅一(日立)  
「LITを用いたパワー半導体内部における欠陥深さの計測」

第57回 日時:2014年9月12日(金)13:30~17:00

- 1: 水越 克郎(アイトランス)  
「マイクロプラズマ加工の故障解析への応用検討」
- 2: 磯林 厚伸(東芝)  
「配線の現状と今後」
- 3: 故障解析SWGとしてのロードマップ改訂に関する議論

予定:第59回 日時:2015年3月20日(金)13:30~17:00

- 1: 大野博文(東芝)  
「半導体パッケージにおける非破壊解析手法の検討」
- 2: 内角哲人(ルネサス)  
「EOP/EOFMによる40nmプロセス製品の裏面タイミング解析」
- 3: 山岡武博(日立ハイテクサイエンス)  
「SPMでナノ表面物性を観る~真空中の電磁気物性観察と  
SEM・ミリング技術連携」

はじめに

ナノIR

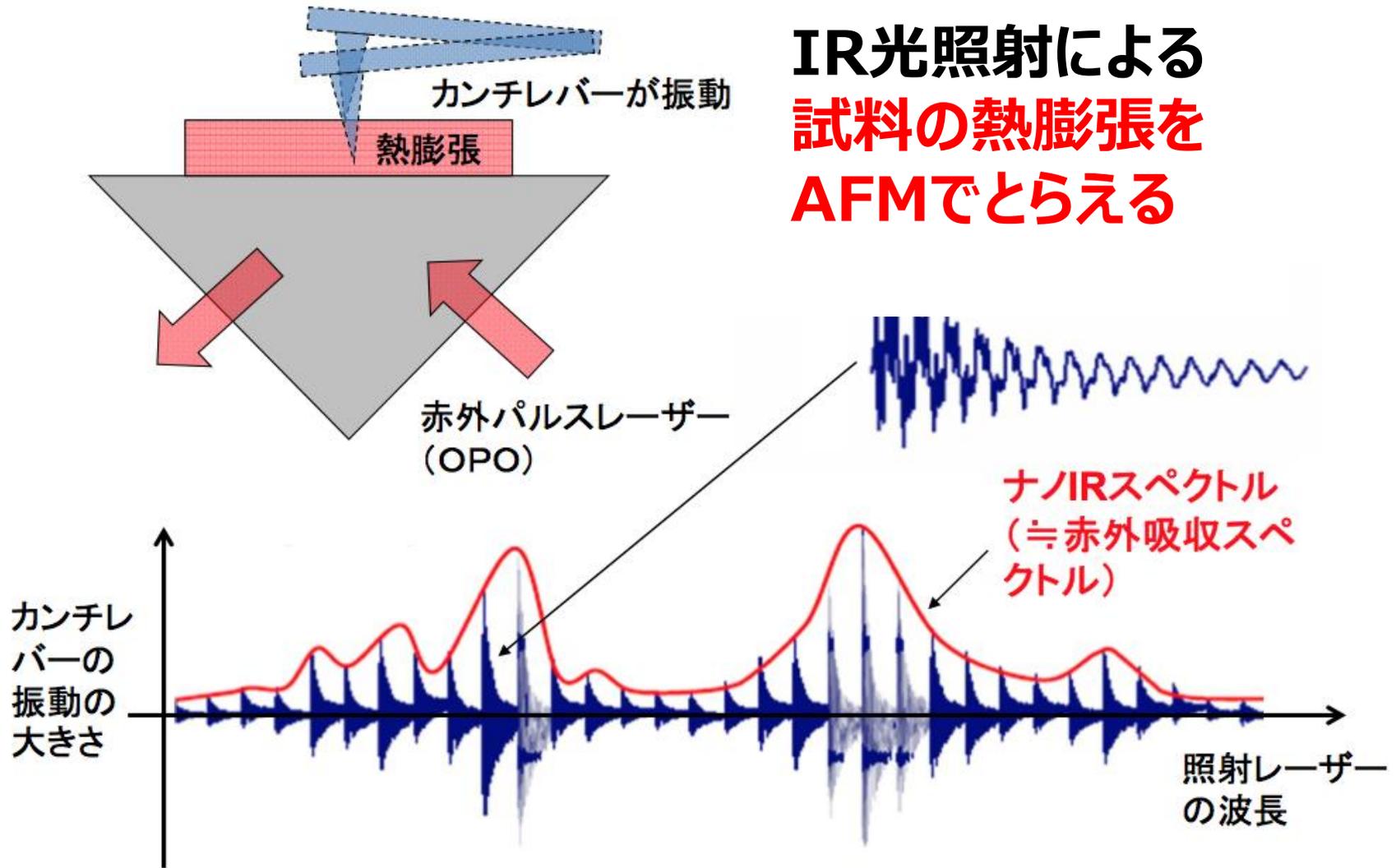
ナノメートルオーダーの空間分解能で  
赤外(IR)分析が可能な装置

赤外(IR)分析法:

官能基、配向、結晶性など化学構造や化学状態の情報を得ることが出来る。

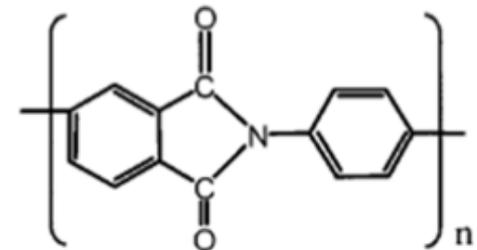
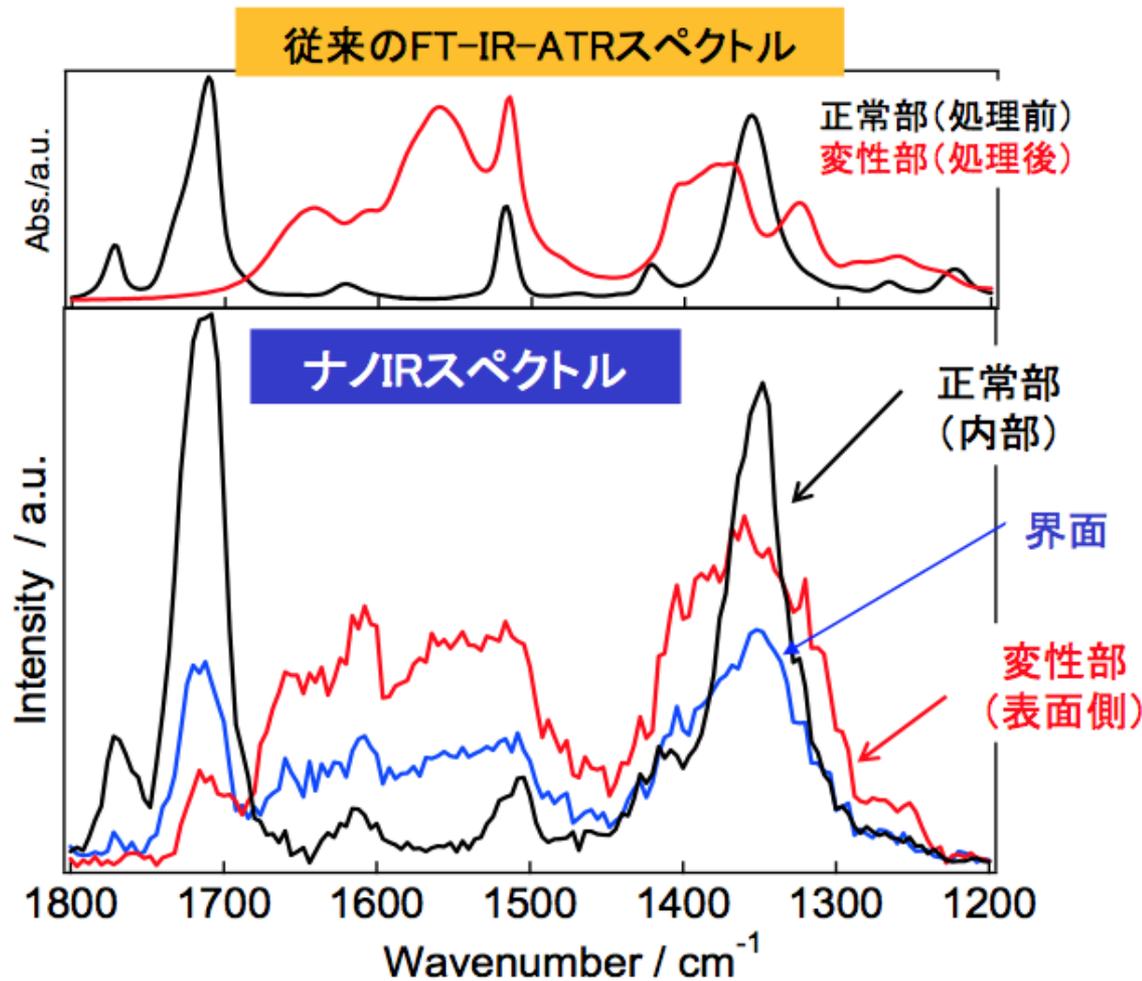
微小領域をみるためには、これまで顕微IR法が使われている。  
→ しかし空間分解能は、数ミクロン～程度。

# ナノIR装置の測定原理

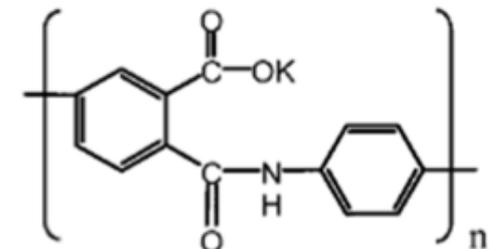


# 分析例③：ポリイミドの変性分析(1)

◆アルカリ処理したポリイミドフィルムの表面変性部と内部の界面を、断面方向から分析。



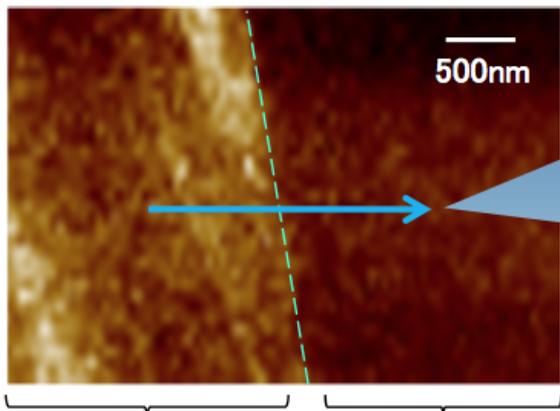
**KOH**  
80°C, 10min.



従来のIRと同等のスペクトルが得られる。

## 分析例③：ポリイミドの変性分析(2)

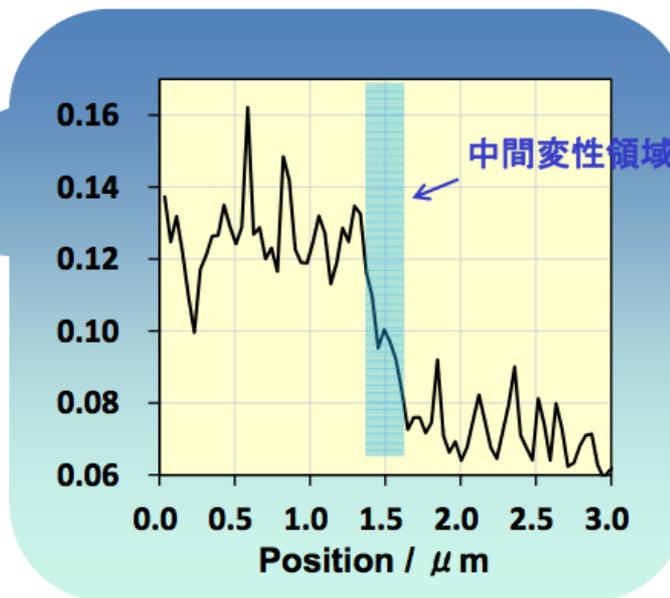
### 1720 cm<sup>-1</sup>のマッピング



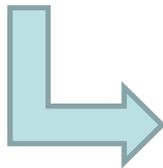
正常部(内部)

変性部(表面側)

### 1720 cm<sup>-1</sup>のラインプロファイル



- ・中間変性領域は、ナノIRの空間分解能(=数100nm)以下
- ・空間分解能約100nmで界面の劣化分析が可能！



LSI構造の中の各種誘電薄膜膜質の局所的評価の可能性  
 ⇒ low-k膜の局所的ダメージ劣化や製造ばらつきの評価  
 —低誘電率膜の結合状態のイメージングなど。

# まとめ

- ITRS 2.0でのMetrologyのWhite PaperではMore Mooreに限らず技術課題を提示した。
- 2014年度STRJ WG14 国内活動で、ERM/ERD計測技術ニーズの観点から高輝度スピン偏極電子源調査や先端MOSトランジスタでの不純物分布計測ニーズから、STEM-WDXによる軽元素評価技術及び特定箇所拡がり抵抗顕微鏡技術などの最新動向調査を実施し、日本固有技術の先行性を確認した。
- 2014年度故障解析SWG活動では、ナノIR法について説明した。

ご清聴ありがとうございました