

第 13 章 WG11 メトロロジ(計測)

13-1 はじめに

2007年度の主な活動は、ITRS国際会議(サンフランシスコ、鎌倉、ボン)の参加、ITRS textの和訳、計測技術のヒアリングである。国際会議における主なポイントは、日本側からの歪み計測の要求表の追加提案のレビュー、2重露光に関する計測要求項目の議論、各WTGからの要求のupdateが挙げられる。MetrologyのTWGの議論においては、ここ2年ほど3次元の非破壊計測に関する関心が高いことが特徴として挙げられる。本論では、2007年度の主な改定の説明と、関心の高い3次元計測について計測のヒアリング結果等をまとめて紹介をする。

13-2 ITRS 2007 Update 版の主な改訂ポイント(図表 13-1 参照)

2007 年度の Metrology に関する主な改定として、従来計測の精度を表す表現として用いられていた“precision”という言葉が“uncertainty”に置き換えられた。これに伴い、uncertainty に関する補足の章(Precision and uncertainty, Sample requirements, Explanation of uncertainty)が追加された。また FEP においては、ゲート絶縁膜の膜厚計測の要求テーブルが細分化され、メタルゲートの仕事関数計測のロードマップも拡充されている。表 1 には代表的 Metrology の要求項目の表を示した。ゲートの Physical CD control は赤色状態であり、その計測の P/T も赤色である。前者は要求値に無理があるようであり、今後見直される可能性が高い。Interconnect の void に関しては、計測技術は以前から追いついていない状況が続いている。

		2007	2010	2013	2016	2018	2020
Technology Node		65 nm	45 nm	32 nm	22 nm	18nm	14 nm
	DRAM ½ Pitch (nm)	65	45	32	23	18	14
	FLASH ½ Pitch (nm)	54	36	25	18	14	11
	MPU Printed Gate Length (nm)	42	30	21	15	12	9
	MPU Physical Gate Length (nm)	25	18	13	9	7	6
	Wafer Overlay Control (nm)	13	9	6.4	4	3.2	2.5
Lithography Metrology							
Gate	Physical CD Control (nm)	2.6	1.9	1.3	0.9	0.7	0.6
	Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance						
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3s, nm) at P/T = 0.2	0.52	0.37	0.26	0.19	0.15	0.12
	Etched Gate Line Width Roughness (nm) <8% of CD	2.0	1.4	1.0	0.7	0.6	0.5
Dense Lines	Printed CD Control (nm)	6.8	4.7	3.3	2.4	1.9	1.5
	Allowed Litho Variance = 3/4 Total Variance						
	Wafer CD metrology tool uncertainty (3s, nm) at P/T = 0.2	1.4	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3
Dual Patterning Overlay Metrology							
	Double Exposure and Etch - Process Range (nm)	9.19	6.86	4.58	3.11	2.55	1.98
	Double Exposure and Etch - Uncertainty (nm)	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2
Front End Processes Metrology							
	High Performance Logic EOT equivalent oxide thickness (EOT), nm	1.1	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	Logic Dielectric EOT Precision 3σ, nm	0.0044	0.0024	0.002	0.002	0.002	0.002
Interconnect Metrology							
	Barrier layer thick (nm)	5.2	3.3	2.4	1.7	1.3	1.1
	Void Size for 1% Voiding in Cu Lines	6.5	4.5	3.2	2.3	1.8	
	Detection of Killer Pores at (nm) size	6.5	4.5	3.2	2.3	1.8	

図表 13-1 ITRS メトロロジロードマップ表の代表的項目

13-3 国際会議での主な議論テーマ

以下に 2007 年度に議論された内容について概要を記載した。これらの議論は 2008 年度以降も継続議論の対象である。昨年度 WG11 から提案した局所応力測定とドーパントプロファイル計測に関して、前者は、今後の叩き台としてロードマップ要求についての情報のインプットを広く求めて行く予定である。

- Precision が Uncertainty に変更になることの経緯、情報の共有。(理解のため掘り下げた議論必要)
- ダブルパターンニングに対する方式の議論(リソとのクロスカット)、および、それに伴う overlay、CD の要求精度の議論。特にマスク計測の要求精度は near term でも赤色で問題だという認識。
- 3 次元構造計測(プロファイル、ラフネス) (継続要求であり、新たに空間像のシミュレーションの精度を高めるためのマスクの 3D 構造(特に微小領域)の計測要求も追加)
- 3 次元計測の計測要求範囲の議論(メモリの FEP、interconnect、Tr 構造)
- 歪み計測の要求項目の見直しと要求値の議論。歪みの計測手法(計測対象、計測領域、空間分解能等)に関しては、現状を review して WG11 から提案した表が、叩き台として ITRS text に記述されている。歪み計測を議論する上での参考として、今後情報のインプット活動を行う。
- チャンネル部の局所応力測定。まだ踏み込んだ議論なし。現状の計測方法、計測精度の把握も必要。
- インライン TEM 試料サンプリングと断面計測。計測 TAT が現実的な問題？
- USJ での 3 次元ドーパントプロファイル計測(特に MUGFET と新プロセス)
- SiGe、Ge、III-V 族チャンネルでのエピ層の品質評価
- TEM 及び HR-XRD、並びに TEM トモグラフィー技術。トモグラフィーは 3 次元構造計測の有力候補としてクローズアップ。Scatterometry による 3 次元形状計測の検証としての有効性も今後議論。
- EUV の照度計測(新規)

13-4 ITRS text の主な改定内容の説明

13-4-1 “Precision”と“Uncertainty”の関係の説明

今回 precision が uncertainty に変わる事に関連して説明の章がいくつか加わっている。両者の関係については、そもそも“precision”の定義は single metrology tool の reproducibility を規定しており、実際の製造ラインにおける計測装置の mix & match の運用や、sampling(計測場所や計測数の選択)の影響が反映されていないという問題がある。そこで今回変更を行ったというもの。“precision”と matching の関係については、図 13-2 に分かりやすく表現されている。Matching は、計測装置間の bias のことであるが、同一ラインに存在する計測装置間の bias から異なるラインに存在する計測装置間の bias が、図中では表現されている。これらの bias(matching)を従来の precision と併せて、それぞれ、Fleet precision、Fleet Measurement Uncertainty と定義している。Fleet precision は、一つのライン内のトータルの計測精度であり、Fleet measurement uncertainty は、ライン間を含めたトータルの計測精度である。図中には sampling という表現は無いが uncertainty には“sampling によるばらつき”が包含される。

また、計測装置間の bias に関しては、一般的には、例えば、標準試料/物質で校正を行うことになるが、これらは、実際のラインで計測する試料とは異なるために、標準試料/物質とライン試料との差が存在する。実際問題、プロセスは時系列に変動をするため、両者の差は一定ではない。さらに標準試料/物質については、ITRS text の標準試料/物質の章で記述されている技術的要件がいつも満たされているとは限らない。

一方、運用上、製品ベースでの標準試料/物質に相当するものを作成する場合もあるが、十分な留意

が必要である。

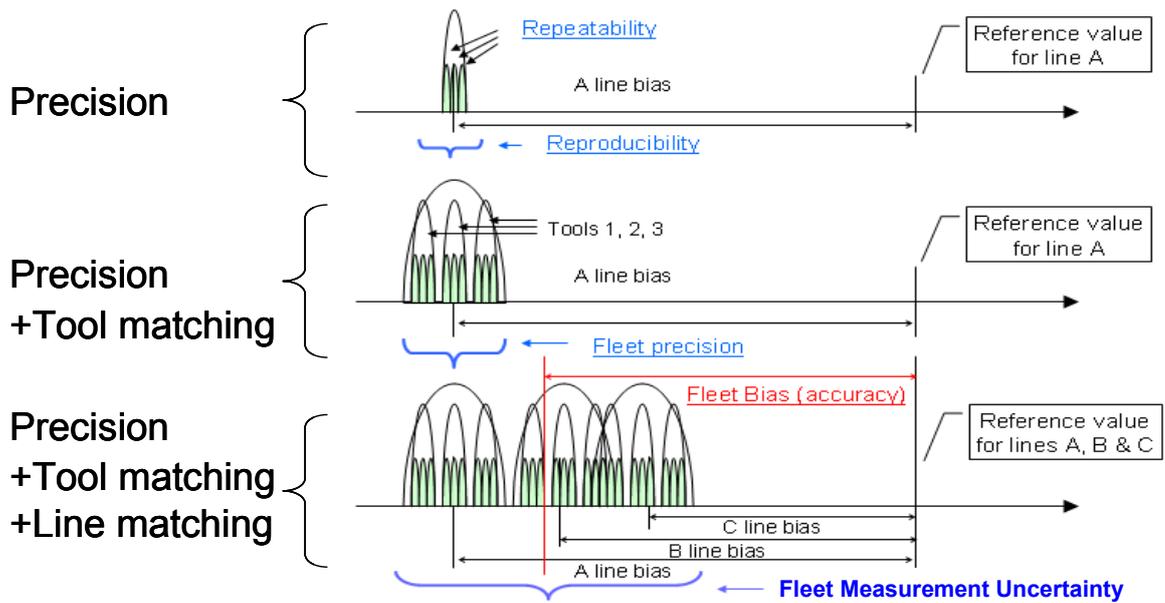


図 13-2 Uncertainty と bias を構成する時間変動、計測装置、計測試料(サンプル)の影響の説明図

ちなみに Reproducibility とは、静止状態における計測再現性 static repeatability、ウェーハの reloading 等を含む動的な動きを伴う計測再現性 dynamic repeatability を包含した時間的な変動を含む計測精度のことである。ITRS の text における repeatability は dynamic repeatability のことを指している。

13-4-2 Sampling に関する要求の説明

Sampling に関しては、“Sampling Requirements”という章が新たに加わった。この章で説明されている内容としては、APC でプロセス制御する場合、sampling(計測場所、計測ポイント数等)においては正確に制御単位であるロット平均、あるいは最近ではウェーハ平均を知る必要がある。そのために適切な sampling を行うことが指摘されている。また sampling の興味の対象としては、APC 制御のような平均値の推定の他に、バラツキそのものを知りたいという要求がある。これも重要な sampling 技術である。

また、Sampling において、特に異種の計測原理である、CD-SEM と scatterometry についても取り扱いの留意が必要である。CD-SEM は小さな領域(例えば FOV:Field of view(視野)200nm とか)を 2 次電子の波形を基に、ユーザーが波形のエッジの場所の定義(例えば、スライスレベル 50%とか)をした上で、2つのエッジ間の距離を計測するものである。一方 scatterometry はグレーティングパターンに光を照射し、反射スペクトル(波長に対するパワー分布)を取得し、形状モデルから予測されるスペクトルを事前にシミュレーションしてライブラリー化した上で、計測スペクトルとの照合を行い、線幅(形状)を特定する原理である。両者においては、原理、プローブ径(計測領域)、計測パターンの違い等々の差から派生する bias が存在する。また、同様の理由で LER and/or LWR の周波数特性の影響も異なる。このため sampling plan も必然的に異なってくる。これを緩和する手法として、CD-SEM では MFM(multiple Feature Measurement)の技術が確立されている。

13-4-3 Uncertainty についての説明

要求表中の precision が uncertainty に変更になったことを受けて、precision と uncertainty の定義の説明の章が追加されている。両者の関係は以下の式(1)で定義されている。

$$\text{Uncertainty} = \sigma = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_M^2 + \sigma_S^2 + \sigma_{\text{other}}^2} \quad (1)$$

バラツキ要素: σ_p (Precision), σ_M (Matching), σ_S (Sampling) and σ_{other} (inaccuracy and other effects)

Uncertainty に関しては、正規分布で 3σ 相当(両側 99.7%の信頼区間)と定義すれば、式(1)の σ は 3σ に置き換えて考えると良い。

また、P/T(Precision to Tolerance)に関しては、式(2)に定義されているが、式表現は従来と変わっていないが、 σ は uncertainty として定義されている。

$$P/T = \frac{6\sigma}{UL - LL} \quad (2)$$

*UL: Upper Control Limit, LL: Lower Control limit, 6σ は $\pm 3\sigma$ のレンジのこと

P/T は要求表では 0.2 ないし 0.1 という値が一般的に設定されているが、式(1)の uncertainty のバラツキ要素 (σ_i) をどこまで考慮するかは、適用する工程や、運用形態によっても変わってくるためユーザー判断事項である。

13-5 Metrology 技術調査のまとめ

今回の WG11 の活動の一環として取り上げた計測技術動向調査のテーマは、過去 2~3 年間ほどで飛躍的に電子顕微鏡の空間分解能を向上させた収差補正器の機能と効果、ならびに今後の展開、そして、計測要求の中でも比較的大きな比重を占める 3 次元計測技術についての現状と課題である。この 2 つにフォーカスした理由は、収差補正器については、電子顕微鏡における ITRS のロードマップ要求を達成するためのコアとなる技術であり、これが世界的にも 1 社に依存している現状と、しかもそれは非常に長い歴史を持って今日に至っているという背景を理解しておく必要があると考えたためである。一方 3 次元計測にあたっては、微細化に伴いデバイス特性、性能を予測するにあたり 3 次元の正確な情報が不可欠になってきた背景がある。3 次元計測は、必然的に破壊を伴うサンプル作成が前提となる計測もあるが、非破壊の可能性が存在しうる計測もある。特に 3 次元の形状計測としての scatterometry のニーズも非常に高いことは注目すべき事である。また最近では非破壊計測の SAXS(Small Angle X-ray Scattering)も 3 次元形状計測の候補として NIST を中心に研究が盛んに行われている。SAXS については、市販化を含め今後の動向が注目される。一方、従来デバイス開発段階で行われていた破壊計測も、インライン計測として用いられる傾向が伺える。これは、ラインのウェーハから FIB で試料を取り出し、取り出したウェーハ上の溝に絶縁物をデポしてラインに戻すものである。こういった状況は、非破壊の形状計測が理想ではあるが、十分な計測精度が実現していないことの現われでもある。いずれにせよ、破壊、非破壊の形状計測については大きな関心が集まっているようである。

具体的な調査項目は以下の通りである。3 次元計測における Atom Probe、SAXS については 2005 年度の報告書等に記載されているのでそれを参照されたい。

<電子顕微鏡における収差補正技術>

- ① 収差補正器の開発の背景
- ② 収差補正器の機能
- ③ 収差補正器を導入した電子顕微鏡の実情
 - STEM, TEM への導入の効果
 - マスク CD-SEM, 観察 SEM への導入の効果

<3 次元計測技術>

- ① TEM + Tomography
- ② OCD (scatterometry)
- ③ 2 次電子を用いた形状予測
 - CD-SEM
 - Ion 顕微鏡

13-5-1 電子顕微鏡における収差補正技術の実用化と空間分解能の向上

13-5-1-1 背景

現在電子顕微鏡の収差補正器を製造しているのは、世界で1社(CEOS)のみである。このCEOS社が、TEM, STEM, ウェーハ顕微鏡、マスク顕微鏡向けの収差補正器を供給している。CEOS社はドイツの会社でその設立の背景を以下に示しているが、収差補正理論の確立から実用化までに80年という長い背景によって電子顕微鏡における空間分解能の向上が達成された。収差補正においては、ハードとしての補正光学系とは別に、収差を自動で正確に追いつむソフトウェア、或いはシステム制御技術の確立が必須である。これについては、電子顕微鏡メーカーが独自に開発に関わっている。

- ① 理論はドイツの Scherzer らによって 1930 代に考案
- ② Rose, Haider へ技術が継承、大学でデータが蓄積
- ③ 1970 年代実用化に近いレンズシステムが考案
- ④ 1980 年代加工技術及び計算機能力の向上によって、実用化のインフラ整備
- ⑤ Zach らによって、複数のレンズの自動制御技術が大きく発展
- ⑥ 1995 年 SEM に於いて Cs・Cc の同時補正実証(Zach)
- ⑦ 1996 年 Haider, Zach によって CEOS 社が設立
- ⑧ 1998 年 TEM に於いて Cs 補正実証(Haider)
- ⑨ 収差補正機の商用化が 2004 年～開始

13-5-1-2 収差補正器の機能

電子光学系の収差について説明をすると、電子光学系はポールピース等を用いた回転対象の電磁レンズを用いて構成されていたため凸レンズしか形成することができなかった。しかも回転対象の電磁レンズを用いた場合、Scherzer's theorem によって色収差や、球面収差係数は正の値しか取りえないという欠点があった。そのため、色収差、球面収差の制約によって長い期間空間分解能の向上が望めなかった。図 13-3(A)は、空間分解能と回折収差、幾何収差、収束半角の関係を示した。空間分解能は、幾何収差と回折収差によって規定され、両者の影響の小さい収束半角(a)を設定することで最小の空間分解能が得られる。図中3次の幾何収差を抑制した場合、回折収差と5次の幾何収差の影響の小さな収束半角(b)を設定することで、より小さな空間分解能が得られる事が分かる。ちなみに収差の次数とは、結像面に電子が入射する角度の次数のことである(図 13-3(B))。

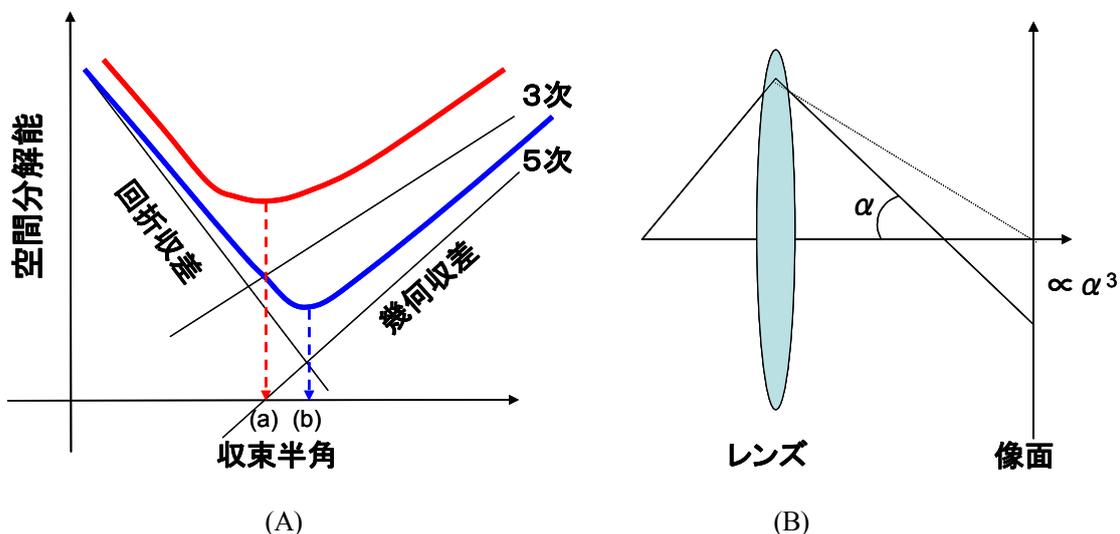


図 13-3 空間分解能と収差、収束半角の関係

1～3 次の軸上幾何収差に関しては、多極子(12 極子)で構成される光学エレメントを複数段(例:4 段)組合せることで、光軸調整を含め補正することが可能となっている。多極子は、機械的精度、材質の不均一性の課題の克服に多くの時間が費やされて実現に至った。また、12 極子は、図 13-4 に示したように独立な $n(1\sim6)$ 回対称の場を形成する。各収差は、これらの場の線形和で表現されるために、実際の電子光学系が組み立てられた後に、内在する収差に対して、その反対符号の係数を与えることで補正することが可能となっている。したがって、収差補正にあたっては、各収差を定量化する技術も必要になる。

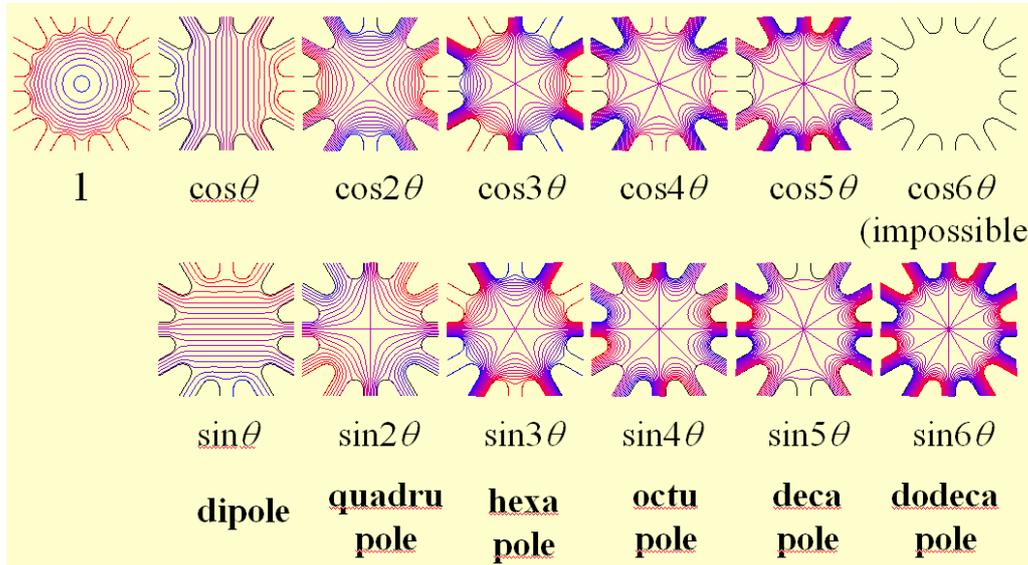


図 13-4 12 極子による形成可能な場(電場表示) (提供: 日本電子)

図 13-5 に示したのは、4 段の 4 極子電磁場による色収差補正のビーム形状変化の例である。例えば 2 段目、3 段目でそれぞれ x 方向、y 方向の色収差を補正する。図 13-6 に示したのは STEM の球面収差補正の例である。適切な 6 極子磁場は、図 13-7 に示すように方向性をもった 2 次収差と‘負’の回転対象な球面収差を発生する。反対称な 6 極子をもう一段追加することで、方向性をもった 2 次収差をキャンセルし、‘負’の球面収差のみを発生させることができる構成になっている。

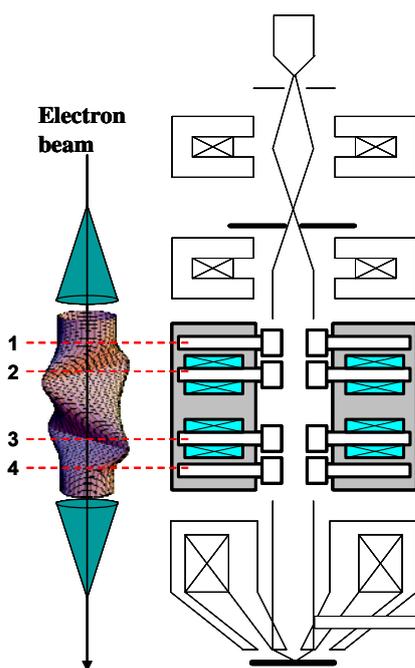


図 13-5 4 極子場による色収差補正

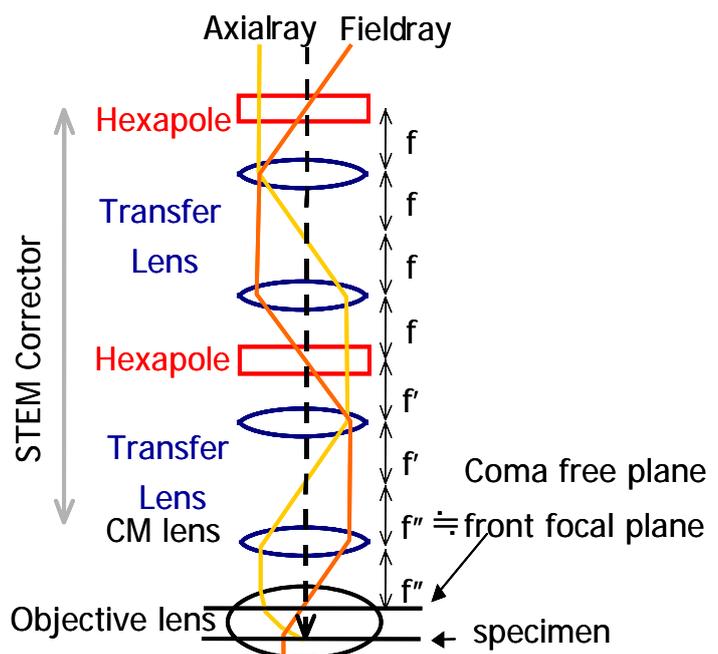


図 13-6 6 極子場による球面収差補正 (提供: 日本電子)

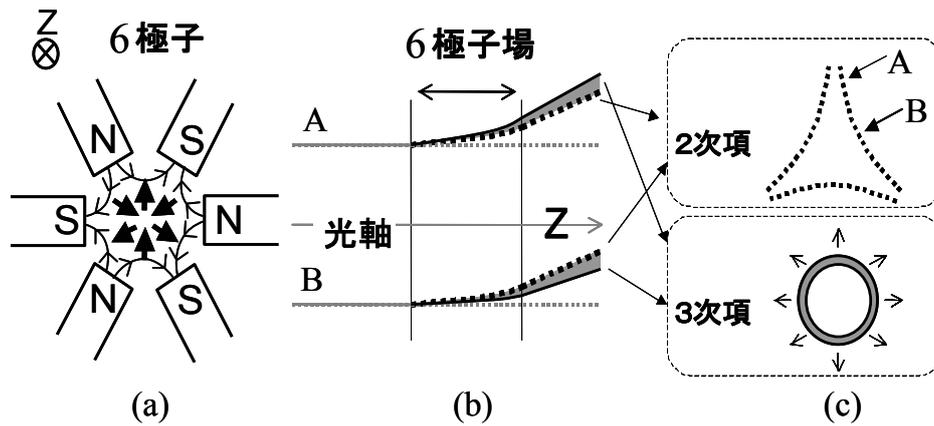


図 13-7 6 極子磁場によるビーム形状の変化 (提供: 日本電子)

このような収差補正において、論理的に収差の補正が可能であるという状況が確立したわけであるが、実用化に当たっては、各々の収差の係数を解かなくてはならない。またこれを自動化する必要性もある。SEM ではプローブ形状は直接観察することができないために、適切な試料の観察像からビーム形状を分離し、さらにそのビーム形状から各々の収差を分解することが必要となる。まず、SEM の観察像は、試料の純粋な 2 次元的情報 $f(x,y)$ と、プローブ強度分布 $g(x,y)$ の convolution $h(x,y)$ であるため(式 3)、フーリエ変換することによって、周波数情報として各々を分離できる(式 4)。

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x+s, y+t)g(s, t)dsdt \quad (3)$$

$$H(u, v) = F(u, v)G^*(u, v) \quad (4)$$

ここで、best focus, defocus を添え字 1, 2 で表し、式(3), (4)を定義すると、

$$G_2 = G_1 \frac{H_2^*}{H_1^*} \quad (5)$$

となり、best focus のプローブ形状が defocus 時に比べ十分に小さいとして G_1 を Gauss 布と仮定することで G_2 を求めることができる。

また、ビーム形状は、図 13-8 に示すように、フォーカス状態によって、各収差固有の特異的な変化をする。図 13-9 は、1 次の非点収差を例に取り、黄色い線で示したように、光軸中心周りに等分割する N 本のラインを設定し、そのラインプロファイルの幅、左右対称性、曲率等を定義することによって、各収差および収差の量を特徴づけることができる。

たとえば、over focus, under focus で形状変化が激しく特徴が分かり易い一次の非点収差については、収差係数 A_1 は、以下のような特徴量として定義できる。また式(6)中の σ は式(7)に示すように、プロファイルの線幅に関する情報量である。

$$A_1 = \frac{2}{N} \sum_m (\sigma_{under-focus, m} - \sigma_{over-focus, m}) e^{2i\theta_m} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_n n^2 p_n}{\sum_n p_n}} \quad (7)$$

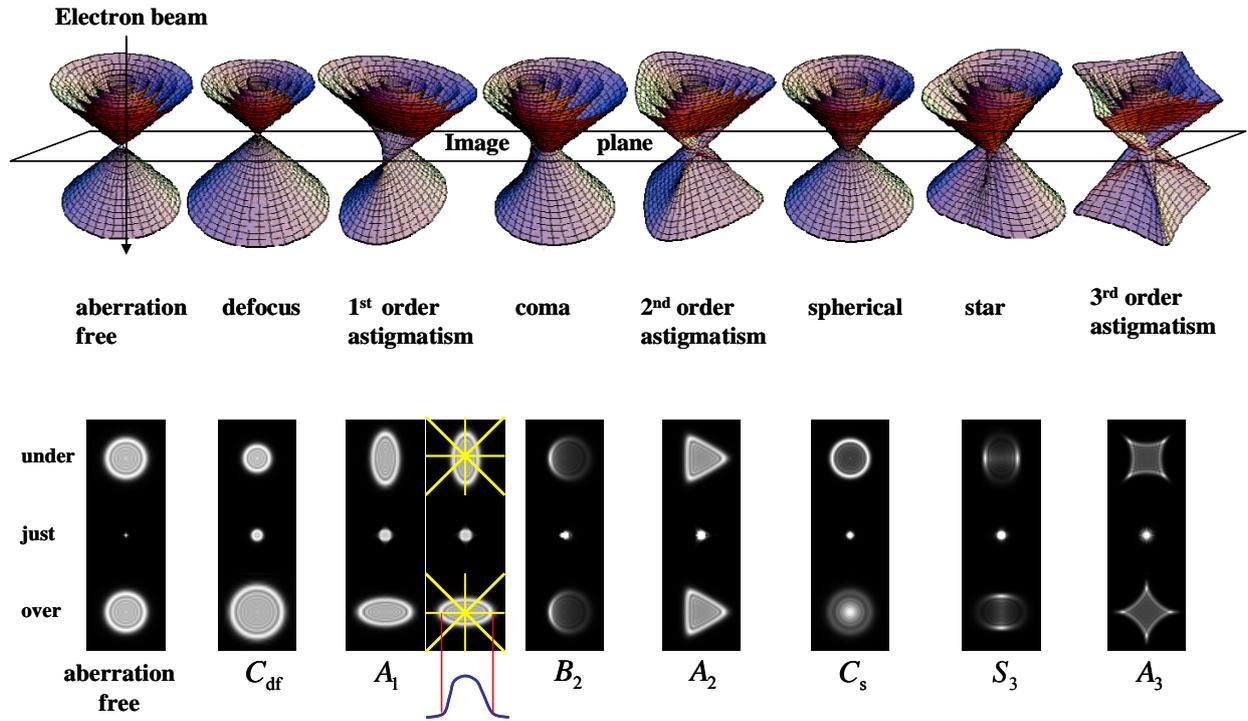


図 13-8 収差による電子ビーム形状の変化(光学シミュレーションによるビーム形状再現) (提供: 日本電子)

一方複数段の 12 極子が形成する標準 4 極子電場、斜め 4 極子電場、標準 6 極子電場、斜め 6 極子電場、標準 8 極子電場、斜め 8 極子電場の強度(強度比)と、発生する収差の関係については計算上既知である。したがって前述の下線で示した説明文の関係より、over-focus, under-focus の SEM 観察像から、各収差を分解・定量化し、収差補正器による各電場の強度(強度比)が決定できることが判る。

図 13-10 上段には、試料の under-focus, over-focus 状態における観察像をもとに収差補正を適用した場合の適用前後の試料の観察像である。図中下段は、観察像から計算上分離したビーム形状であり、収差補正器によるその形状の変化の様子が伺える。

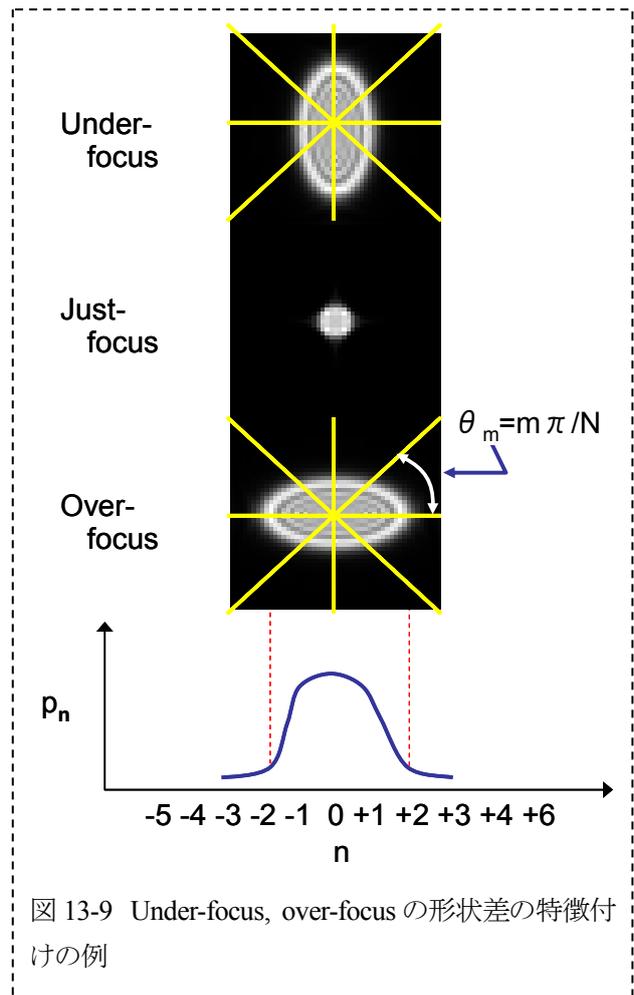


図 13-9 Under-focus, over-focus の形状差の特徴付けの例

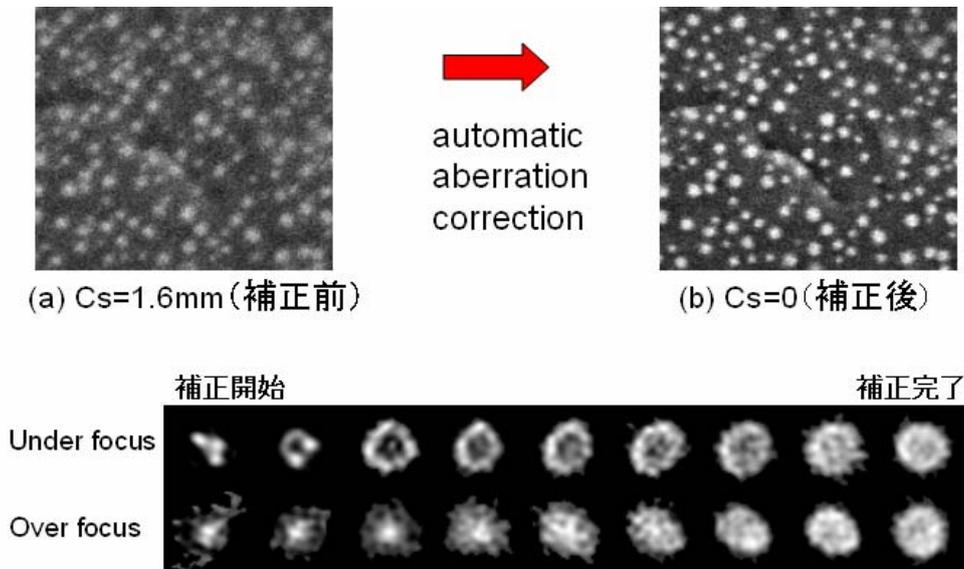


図 13-10 収差の自動調整によるビーム形状の変化 (提供: 日本電子)

13-5-1-3 収差補正を適用した STEM の効果事例

図 13-11 に示したのは、Au(100) single crystal の HAADF(High Angle Annular Dark Field)-STEM 画像である。収束半角は、図中にも記載されているが、収差補正無しで 8 mrad、収差補正器有りで 25 mrad である。本画像から収差補正器有無による空間分解能の差が明瞭に伺える。本画像は、2006 年に取得されたものであり、現在は、さらに 0.7×程度の空間分解能の向上が達成されている。空間分解能は、収差補正器のみならず電子顕微鏡単体の残収差のレベルにも大きく依存しているため、収差補正器と合わせて継続的な改良が進められているのが現状である。

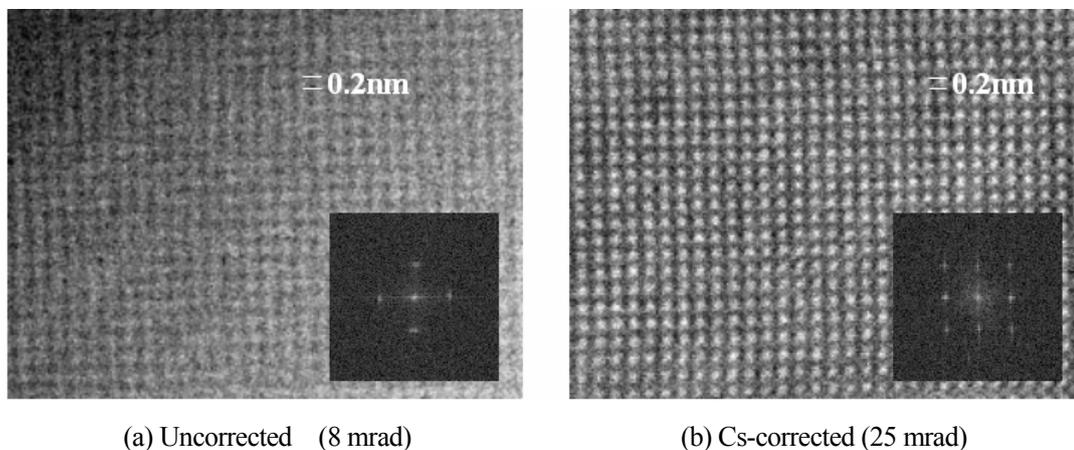


図 13-11 収差補正有無の STEM 画像例 (提供: 日立ハイテクノロジーズ)

13-5-1-4 収差補正を適用した Mask-SEM の効果事例

Mask の CD-SEM あるいは観察 SEM は石英基板、遮光材料によるチャージングの課題の解決が最優先課題であった。その解決策として、低真空化によって残存する分子を一次電子ビームによって乖離させ、発生するプラスのイオンによってマスク観察表面のチャージを中和する試みが行われてきた。しかしながら、このイオン化は同時に新たな電子の発生を伴うために、観察像の S/N が悪化するといった問題を抱えていた。このために landing voltage を下げ 2 次電子の放出効率を高めることが必須となった。しかしながら低エネルギー化は同時に収差の影響を受けやすいと言った技術的な課題が残っており、この解決には、収差補正器の存在が必要

不可欠であった。このような低真空技術(差動排気システム)、イオン化による中和技術、収差補正技術が上手く総合的に機能して、チャージングの無い高い計測再現精度が実現している。図 13-13 には収差補正有無の観察像の一例を示した。

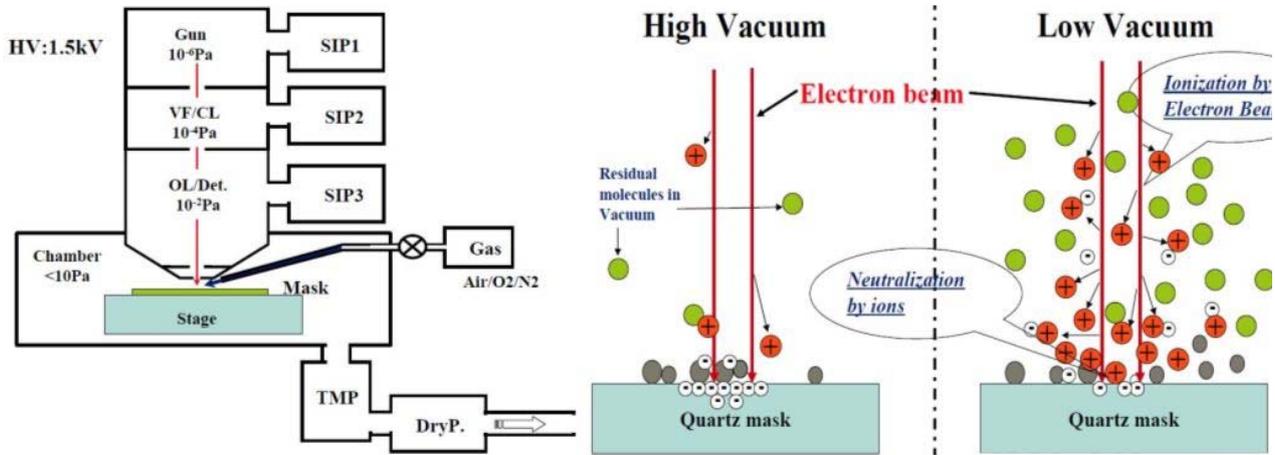


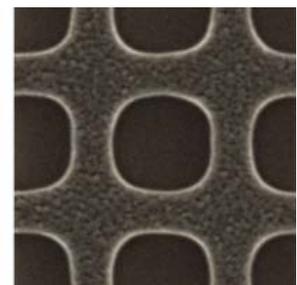
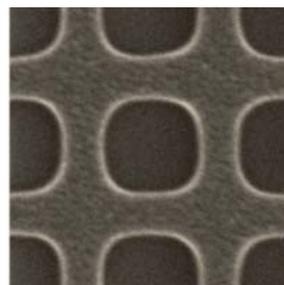
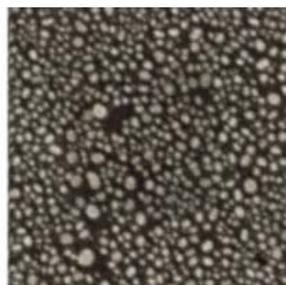
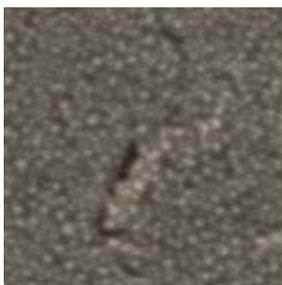
図 13-11 差動排気技術と、残存分子のイオン化による2次電子の表面チャージの抑制 (提供:HOLON)

Performance (HOLON-STD Mask)		EMU-270	EMU-270A
Static	L&S	0.4nm	0.3nm
	Contact	1.0nm	0.4nm*
Dynamic Short-Term	L&S	0.6nm	0.45nm
	Contact	1.2nm	0.55nm*
Dynamic Long-Term	L&S	0.72nm	0.55nm
	Contact	1.4nm	0.65nm*
Image Resolution (Gold Particle)		3nm at 1kV	1.5nm at 1kV
Charge and Contamination		Low Vacuum	Low Vacuum
Electron Optics			Aberration Corrector
Automation			New Holon PTM Alignment site
Metrics			2D (Area, End-to-end) Large-Field-Mode

図 13-12 収差補正器による計測再現性度の向上 (提供:HOLON)

Gold particle, 1.5KV, 7pA, FOV = 0.7 μm

1.5KV, 7pA, FOV = 1.0 μm



(a) Without Corrector

(b) With Corrector

(c) Without Corrector

(d) With Corrector

図 13-13 収差補正器有無による観察像の違い (提供:HOLON)

13-5-2 TEM + Tomography による高空間分解能の 3 次元形状計測

TEM, STEM は前述の収差補正器の導入によってここ 2~3 年で空間分解能の飛躍的な向上を実現できた良い成功事例である。この TEM に Tomography の技術を応用し、3 次元で形状計測する開発が進められ 2007 年度によろやくその完成に至った。従来 TEM は FIB で試料を切り出し、薄片に加工し、高加速電子(200~300KeV)の透過像を観察するものであるが、1 断面しか観察できない欠点があった。また興味の対象となる面を正確に切り出す操作も容易ではなかった。ところがトモグラフィー技術を応用することで観察すべき断面を直接切り出して薄片加工する事無く、棒状に切り出された試料内部の構造が 3 次元で観察することが可能となった。

Tomography の原理について説明をすると、TEM としての電子顕微鏡としては、図 13-14 に示した様に高加速(200~300KeV)で均一な電子を、コリメータレンズ系を通して試料に照射し、対物レンズ、投影レンズを経て画像センサー上に拡大投影する構造になっている。画像センサーはラインセンサーなため、imaging coil によって透過像をセンサー上で走査して試料全体の透過像を得るものである。

図 13-15 には、図 13-14 の棒状の試料の断面の絵が描かれている。今断面を透過した直線状の電子の透過像を考える。あらかじめ試料に対しては x-y 直交軸を定義しておく。試料を例えば 0.5 度単位で回転させながら、透過像 $P(r, \theta)$ を取得する。図 13-15 中には、試料を角度 θ 回転させた状態($r-s$ 直交軸)を示している。実際には、試料を回転させているわけであるが、図中の表記では便宜的に電子の入射する方向が θ 回転しているように示されている。

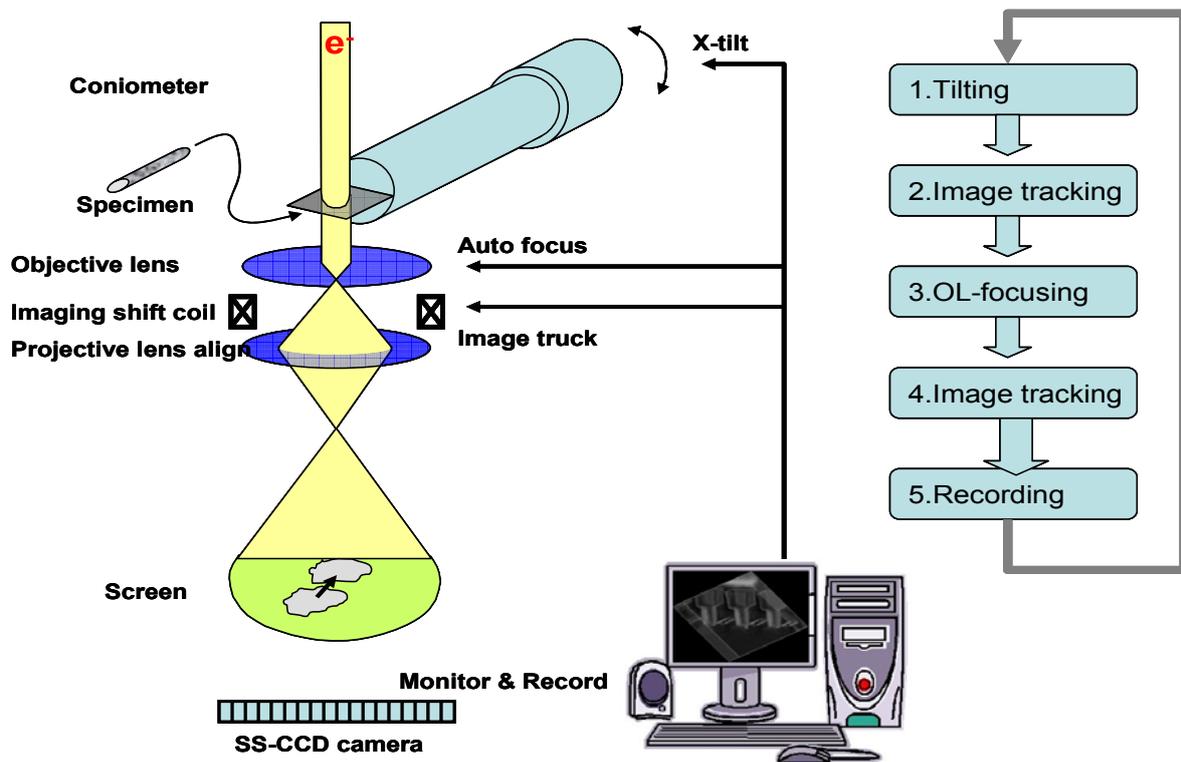


図 13-14 Tomography 観察用 TEM (出典:材料の科学と工学 2006No5)

Tomography で重要なことは、 r 軸と平行な軸における試料を横断した透過像 $P(r, \theta)$ の r 軸方向の 1 次元のフーリエ変換は、2 次元の横断面の $f(x, y)$ ($f(x, y)$ は $x-y$ 平面における単位長あたりの電子の透過率を表す関数)をフーリエ変換した 2 次元の周波数空間におけるスペクトル分布 $F(X, Y)$ の角度 θ 方向の 1 次元の周波数スペクトルに対応しているということである。したがって、角度を変えながら $P(r, \theta)$ のフーリエ変換を行うことで、推定すべき断面の 2 次元の周波数情報($F(X, Y)$)がすべて求まることになる。(ただし、情報は $F(R, \theta)$ なの

で $(R, \theta) \Rightarrow (X, Y)$ の軸変換と補完処理が必要である) 求めた $F(X, Y)$ のフーリエ逆変換を行えば、もとの断面像 $f(x, y)$ が再現されることになるわけである。この操作を $f(x, y)$ の奥行き方向で行えば、3 次元の透過像としての 3 次元形状が再現できることになる。(補足参照)

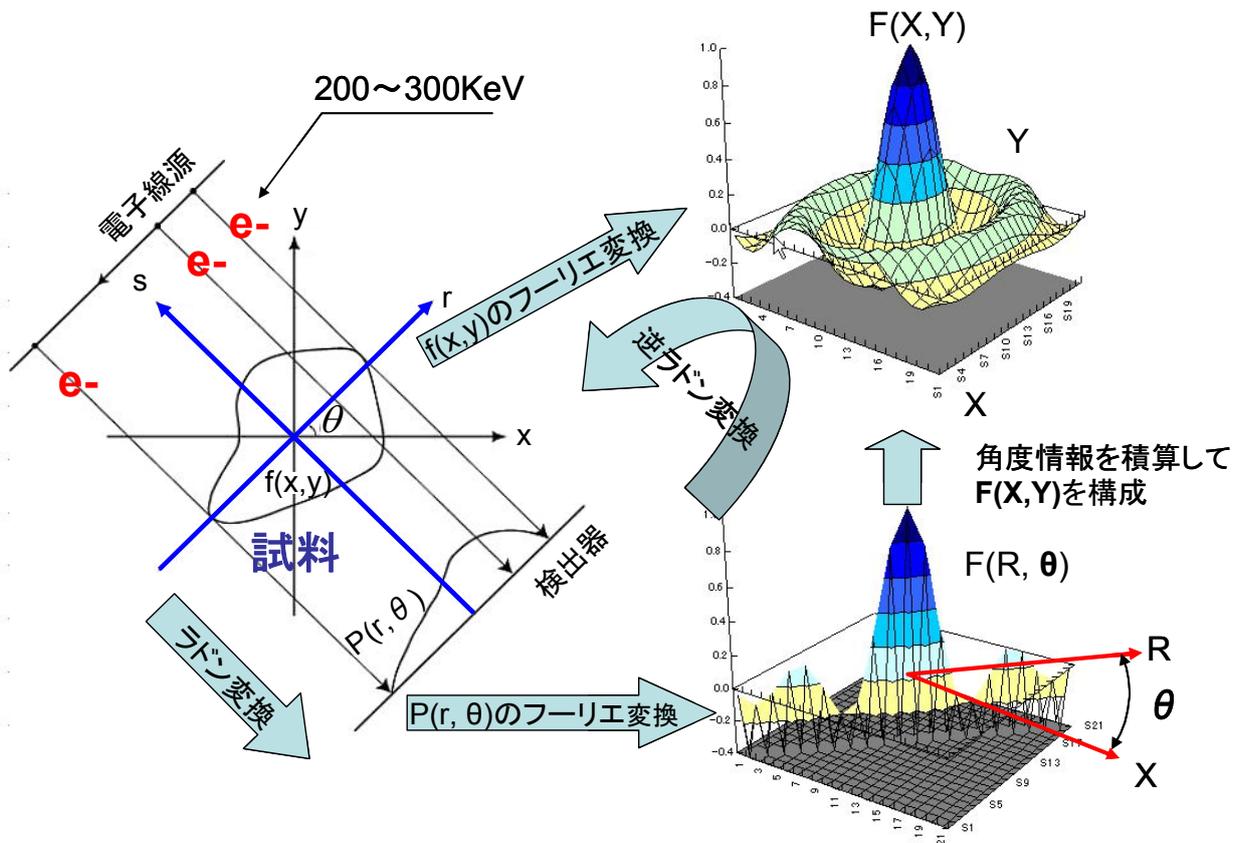


図 13-15 TEM の Tomography の計測原理

[補足] Tomography における画像再現の変換式は以下を参照されたい。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} \Rightarrow x = r \cos\theta - s \sin\theta, \quad y = r \sin\theta + s \cos\theta \quad (8)$$

$$P(r, \theta) = \int f(x, y) ds = \int f(r \cos\theta - s \sin\theta, r \sin\theta + s \cos\theta) ds \quad (\text{ラドン変換}) \quad (9)$$

$$F(X, Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i2\pi(xX+yY)} dx dy \quad (f(x,y)\text{のフーリエ変換}) \quad (10)$$

周波数空間における R 軸上では、 $X = R \cos\theta, Y = R \sin\theta, r = x \cos\theta + y \sin\theta$ であるので、式(10)に代入して、

$$\begin{aligned} F(R, \theta) &= F(R \cos\theta, R \sin\theta) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r \cos\theta - s \sin\theta, r \sin\theta + s \cos\theta) e^{-i2\pi((r \cos\theta - s \sin\theta)R \cos\theta + (r \sin\theta + s \cos\theta)R \sin\theta)} ds dr \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r \cos\theta - s \sin\theta, r \sin\theta + s \cos\theta) e^{-i2\pi(xR(\cos^2\theta + \sin^2\theta))} ds dr \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} f(r \cos\theta - s \sin\theta, r \sin\theta + s \cos\theta) ds \right\} e^{-i2\pi xR} dr \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} P(r, \theta) e^{-i2\pi xR} dr \quad * F(R, \theta) \text{が} P(r, \theta) \text{から求められる} \end{aligned}$$

(11)

図 13-16 には最近の TEM の 3 次元 Tomography 像を示した、試料は、BEP(back End process)の Cu 配線の一部である。配線の構造が非常に明瞭な画像として再現されていることが分かる。

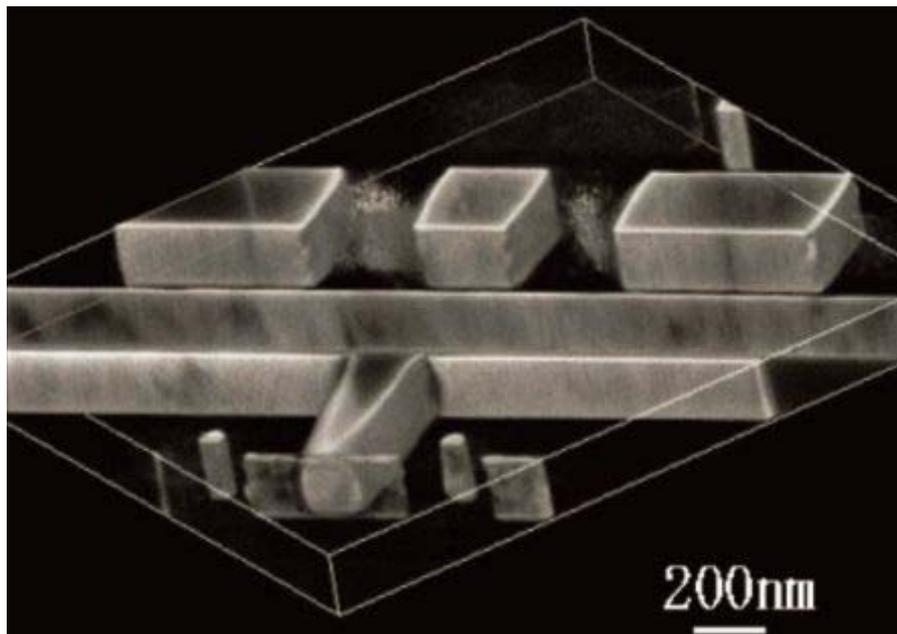


図 13-16 Cu 配線の TEM の Tomography 像 (提供: 東レリサーチセンター)

同様に、図 13-17 では、ゲートに適用した場合の TEM の Tomography 像である。ここ 3 年程度話題であった、LER(Line edge roughness)の様子が、エッチング後の poly-Si gate で明瞭に観察できている。また 3 次元の Tomography のデジタルデータによって容易に LER を定量化することが可能であり、図 13-17 の右側には、ゲートの LWR(Line Width Roughness)がゲートの高さ方向で大きく変換していることが定量化されグラフ化されている。このように 3 次元のデジタルデータから様々な形状尺度が容易に定量化することができることは重要な事である。

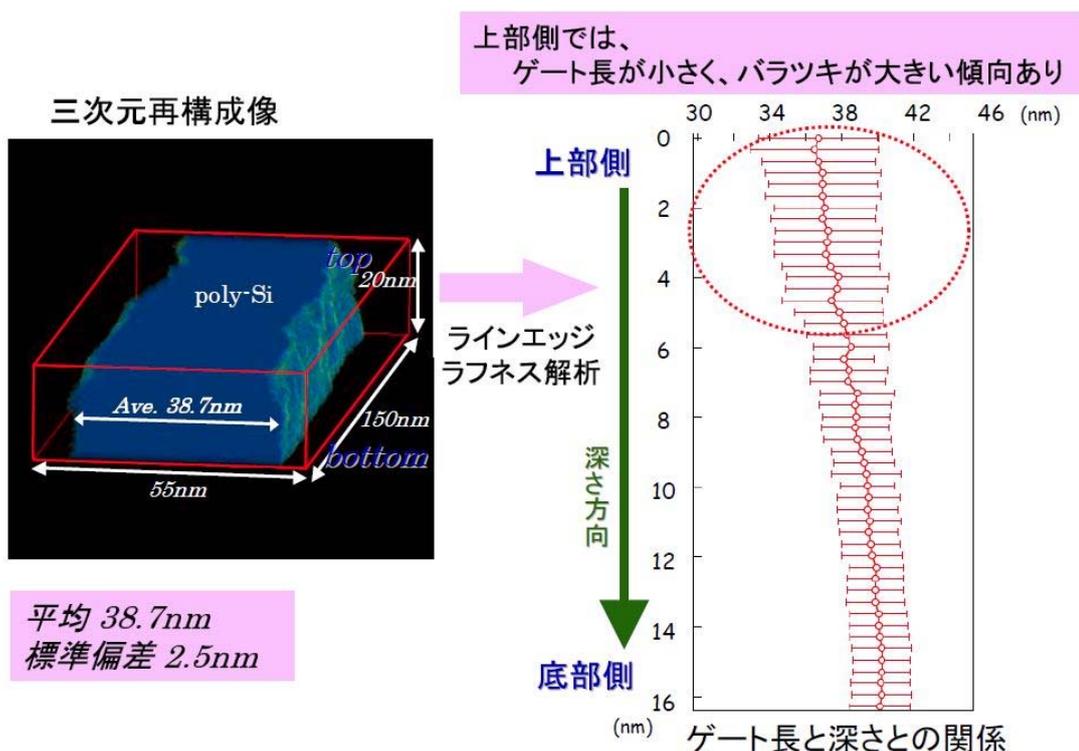


図 13-17 ゲートの LWR の計測事例 (提供: 東レリサーチセンター)

ここで TEM の Tomography の技術的な課題を述べると、試料の回転に伴い、nm オーダーで中心軸が変化することに対応して、絶えず軸中心を探索しながら補正してゆく必要があることである。現在では、軸中心を探索して補正するアルゴリズムが開発されたため比較的短時間で分解能の高い計測を実現するに至っている。しかしながら、回転軸の加工精度の向上は、画像再生の分解能を向上させる可能性があるのではないかと考えられる。

TEM の Tomography は破壊検査ではあるが、3 次元のプロセス形状診断を行う上で非常に有効な計測手段として今後普及が進むものと思われる。その際には、試料作成時間の短縮が望まれるところである。

13-5-3 Scatterometry による非破壊 3 次元形状計測

Scatterometry は近年 CD-SEM に代わる、あるいは補完する線幅計測技術として市民権を得るに至っている。また、3 次元の形状計測技術としても、研究や実用化が進展している状況である。しかしながら、scatterometry の計測は、物理モデルをベースとした数値解析による推定であり、しかも、形状パラメータの自由度に制限があることや(特に、計算スピードの関係上、各材質の複素屈折率は固定にせざるを得ない状況である)、そのパラメータの定義もユーザーに委ねられているといった問題がある。このため、ユーザーのスキルにその精度が依存するとすることもあり得る。したがって現時点では、通常のインライン計測機とは一線を引く必要があるのではないかと考えられる。現在の一般的な scatterometry による線幅計測、あるいは形状計測は、図 13-18 に示したような手順で行われている。例えば、レジストの線幅、あるいは形状を計測したい場合、通常のプロセス上で変動しうるレジスト形状の範囲を理解したうえで(a)、形状モデルを作成する(b)。(b)では、レジスト形状として 3 つの台形による構成になっている。また、基盤材料とレジストの膜厚、複素屈折率は事前に定義する必要がある。この形状モデルにおいて、形状パラメータとして、レジストの top の台形形状(top 台形の top 線幅、bottom 線幅、高さ)、middle の台形形状(middle 台形の top 線幅= top 台形の bottom 線幅、bottom 線幅、高さ)、bottom の台形形状(bottom 台形の top 線幅= middle 台形の bottom 線幅、高さ)が変化した際の、scatterometry によるスペクトルを計算によって求めデータベース(ライブラリー化)しておく。次に scatterometry による実際の計測機を用いた試料からのスペクトルに対して、最も近いライブラリーデータを検索し、基となる形状データを引き当てるものである。

前述したような形状パラメータの制約や、複素屈折率の制約、およびユーザーに最終的な形状モデルの定義が委ねられている事もあり、まだまだ開発要素が多いと予測される。しかしながら、Scatterometry は非破壊で簡便な計測技術がゆえに 3 次元計測としての期待は高く、モデルの高精度化、自動化へ要求は強いものがある。今後も注視すべき重要な技術であることには間違いない。

また、3 次元の形状計測としては、標準試料の作成およびその検証のための計測機も必要だと考えられる。形状標準の計測機としては前述した TEM + トモグラフィーや表面形状であれば AFM もその対象となることが予想される。このような取り組みも併せて進捗するような啓蒙活動も必要である。一方、同様な技術としては、物理モデルが簡便な SAXS への期待も大きく、市販化が期待されている。

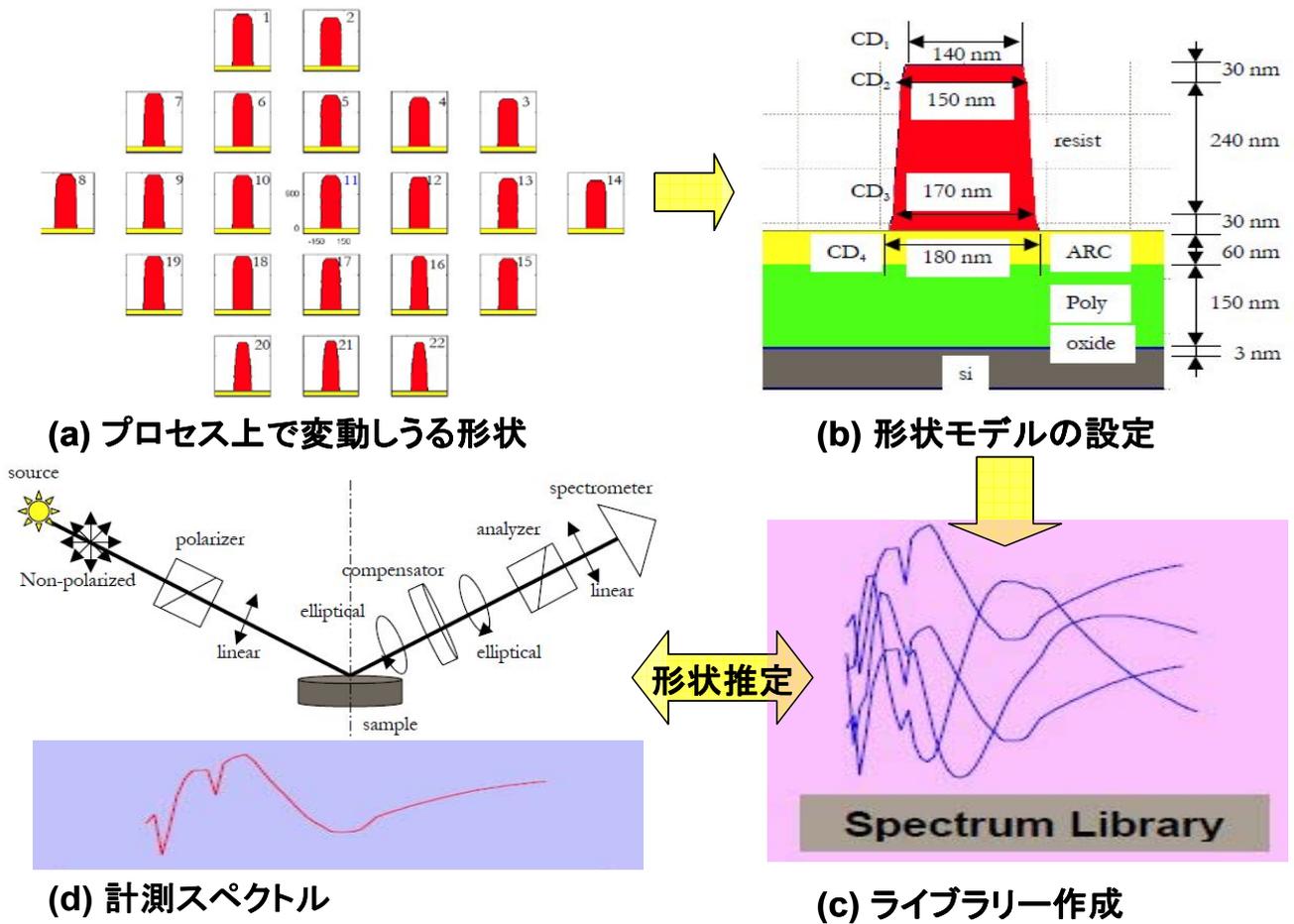


図 13-18 Scatterometry の計測手順

13-5-4 2次電子波形分析による形状計測

ウェーハ CD-SEM では、試料からの 2 次電子の波形から線幅を定義しているが、この 2 次電子の波形は、観察試料の外形形状との関係があることは事実である。したがって、ゲートパターンなどの単純ではあるが高精度な加工を要求されるパターンの計上計測にあたっては形状を反映しうるパラメータを 2 次電子波形から抽出することである。

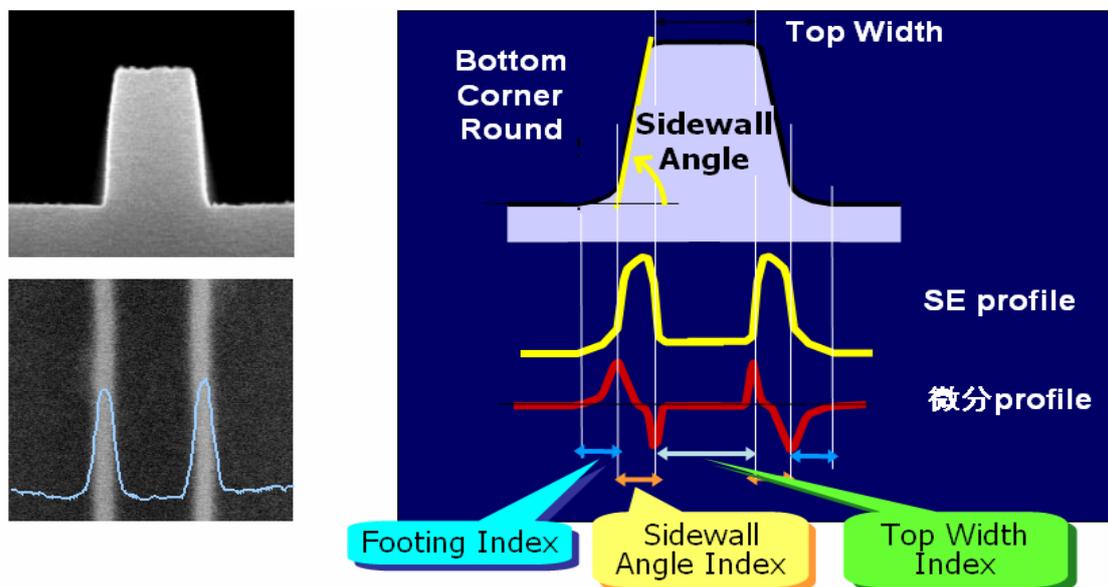


図 13-19 CD-SEM の 2 次電子波形による形状推定 (提供: 日立ハイテクノロジー)

例えば、本例では、2 次電子波形の微分波形から裾引き情報(footing)や、テーパー角度(sidewall angle)、top 線幅を定義しようとしている。形状の予測精度に関しては、プロセス変動におけるパターン形状変動を反映した複数の断面形状情報と、対応する 2 次電子波形の情報とのマッチング度合いによって判断される。2 次電子波形自体、試料の物理的な断面形状ばかりでなく、表面のコンタミや、表面のチャージング、表面の材質変化(酸化等)の影響を受けるため、試料自体の状態変動が抑えられている環境が必要である。また非常に簡便な手法でもあるため、2 次電子波形のシミュレーションを併用した形状予測の研究が成されている状況である。

13-5-5 イオン顕微鏡による空間分解能の向上と形状計測の可能性

イオン顕微鏡は、現状の SEM の抱える問題点として、空間分解能が 20 nm 前後のピッチパターンで破綻すると予測されていることから、将来的な線幅計測の手段として研究および実用化が図られている状況である。破綻理由は、入射電子の試料への入射位置に対して、試料内部数 nm 程度半径から 2 次電子が発生することによるボケである。一方、He ion を用いた顕微鏡では、試料への進入距離がほとんど無く、試料表面からの 2 次電子のみで画像が形成される利点がある。このため、SEM では観察できない、試料表面の状態が可視化できる可能性が高く、高分解能の観察手段(欠陥検査等)としての需要も高いと考えられる。このような高分解能の顕微鏡を用いて、前述した SEM による形状予測と同様なことがより正確に出来るのではないかと期待される。また He ion 顕微鏡の仕様概要、2 次電子の特徴なども下段破線枠内に示した。

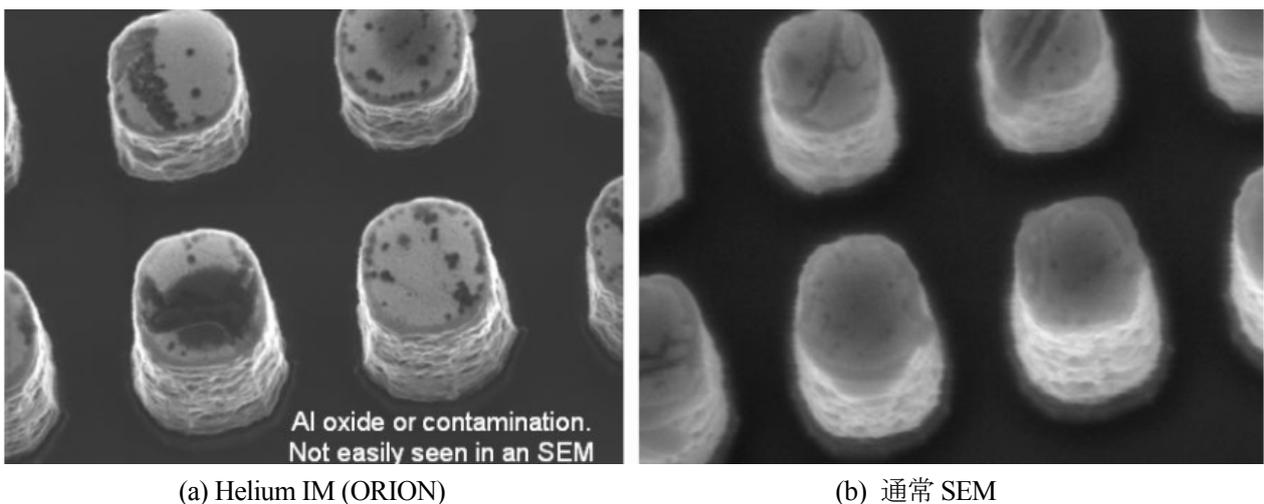


図 13-20 He-ion の観察画像と通常 SEM との観察画像の比較 (提供:ALIS corporation)

装置仕様

Maker: ZEISS

Ions: He+ (Ne, Ar, etc)

Current: 1 to 20 pA

Energy: 5 to 45 keV

Resolution: 0.9 nm's @ 45 keV

Detectors: ET & MCP

Stage: 5 Axis, 50,50,15 mm's of X,Y & Z

Secondary Electrons:

Provide detailed localized surface information

Yield varies greatly with material

...ranges from ~2 to ~8

Yield varies with topography

...varies as $1/\cos(\alpha)$

SE energy mean ~ 2 eV

Yield easily altered by local E & B fields

Short SE range permits imaging of Low Z materials

13-5-6 技術調査のまとめ

2007 年度の技術テーマとして、電子顕微鏡の空間分解能向上に大きく貢献した収差補正器と、技術課題も大きいながら、非常にニーズの高い 3 次元計測として、TEM の Tomography、scatterometry、2 次電子による形状予測を取り上げた。収差補正器については、様々な電子顕微鏡への応用が進んでおり、高分解能で試料観察できる領域が拡大しつつある。今後収差補正器自体の性能の向上も期待されるが、電子顕微鏡固有の残存収差を小さくすることも、空間分解能をさらに向上する意味では必要だと思われる。今後も注視してゆきたい技術である。

3 次元計測については、インラインでの非破壊のニーズは非常に高く、早急な課題の克服が望まれる。一方、現実の 3 次元計測の必要性において、破壊による計測は必要な精度を提供しつつある。課題として挙げられるのは、簡便で短時間の試料作成である。計測時間については次第に高速化されてきており、今後も継続的な改善が望まれる。3 次元計測としては 2005 年度報告書でも取り上げた、dopant の 3 次元計測の Atom probe や、3 次元形状計測としての SAXS も今後継続した調査を行ってゆく必要があると考えている。

13-6 全体のまとめ

計測は、カバーする範囲も広く、しかも技術的な課題の把握が難しい分野でもある、SEAJ や計測研究機関等とも情報の共有を積極的に進めて効率的な技術調査を行い、ロードマップへの反映を迅速に行って行きたいと考えている。