

X線散乱法による半導体デバイスパターン形状計測 Measurement of Semiconductor device pattern by X-Ray Scattering

表 和彦^a, 伊藤 義泰^a, 岡崎 祐子^a, 中山義則^b
Kazuhiko Omote^a, Yoshiyasu Ito^a, Yuko Okazaki^a, Yoshinori Nakayama^b

^a(株)リガク, ^b(株)日立製作所 中央研究所
^aRigaku Corporation, ^bHitachi, Ltd., Central Research Laboratory

微細化の進行が続く半導体デバイスの繰り返し周期パターンにおける重要な形状パラメータであるピッチ, 線幅や高さ, 側壁角度や線幅の乱れなどを非破壊で測定する目的で表面 X 線散乱法を適用した. 周期パターンによって回折した X 線強度を検出器のスキャンにより表面に平行 (Y) 方向および法線 (Z) 方向における散乱角の関数として表し, パターン形状のモデルに基づいた計算と比較することにより, 前述のパラメータだけでなく, パターン頂部や底部におけるラウンド径も決めることができた.

キーワード: Device pattern, Critical dimension (CD), Grazing incidence x-ray scattering (GIXS), Nanostructure

背景と研究目的:

近年の半導体デバイスの微細化はとどまるところを知らず, ITRS (国際半導体技術ロードマップ) が予測するトランジスタにおけるゲート電極のハーフピッチ寸法は 2010 年以降 40 nm を切り, 20 nm あるいはそれ以下のサイズも視野に入れられている. しかし, そのような微細な形状を精度良く計測する方法は, 破壊測定でかつ試料作成に手間のかかる TEM (透過電子顕微鏡) などに限られており, ナノメートルの分解能を持つ新しい形状計測・検査のための手法が求められている. また単に平均的な形状だけでなく, LER (Line Edge Roughness = ライン側壁の粗さ) など数 nm オーダーの形状乱れがデバイス性能に大きく影響を与えることが指摘されており, そのような乱れの計測も重要な課題である. そのため我々は, X 線散乱を用いた形状計測方法の実現を目指し, まず理想的な X 線源である SPring-8 による実験で, 必要な情報が得られるかどうかの検討を行った.

実験:

今回は, 現在半導体製造プロセスでの形状計測に最もよく使われている CD-SEM (限界寸法測定走査電子顕微鏡) 像のスケールを決定するための 100 nm ピッチ標準試料 [1] (図 1 参照) を用いた. 使用した X 線のビームラインは, 高輝度で高い平行性を持つ X 線が得られ, かつ, ゴニオメータが今回の測定に必要な反射配置で表面に対し微小な角度での入射・散乱 X 線を利用するいわゆる GIXS (grazing incidence x-ray scattering) 法を適用することが容易な BL46XU を用いた. なお, X 線のエネルギーは 10.5 keV であった. 測定試料は 100 nm ピッチで周期構造になっているため, 小角散乱領域にその周期を反映した強い回折ピークが多数現れる. まずそれぞれのピークに注目し, 検出器を Z 方向に走査することによる強度変化を記録する. その手順をそれぞれのピークごとに

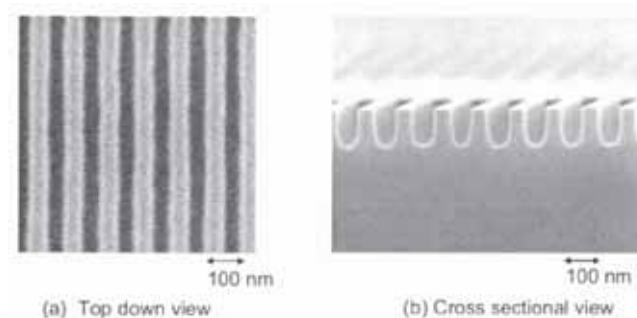


図 1. 測定した試料の SEM 像

行うことにより、二次元的な回折強度分布が測定される。その結果を図2に示した。図の横軸は回折次数である。SPring-8の強力なX線を用いることにより、29次までの回折X線が観測されていることがわかる。

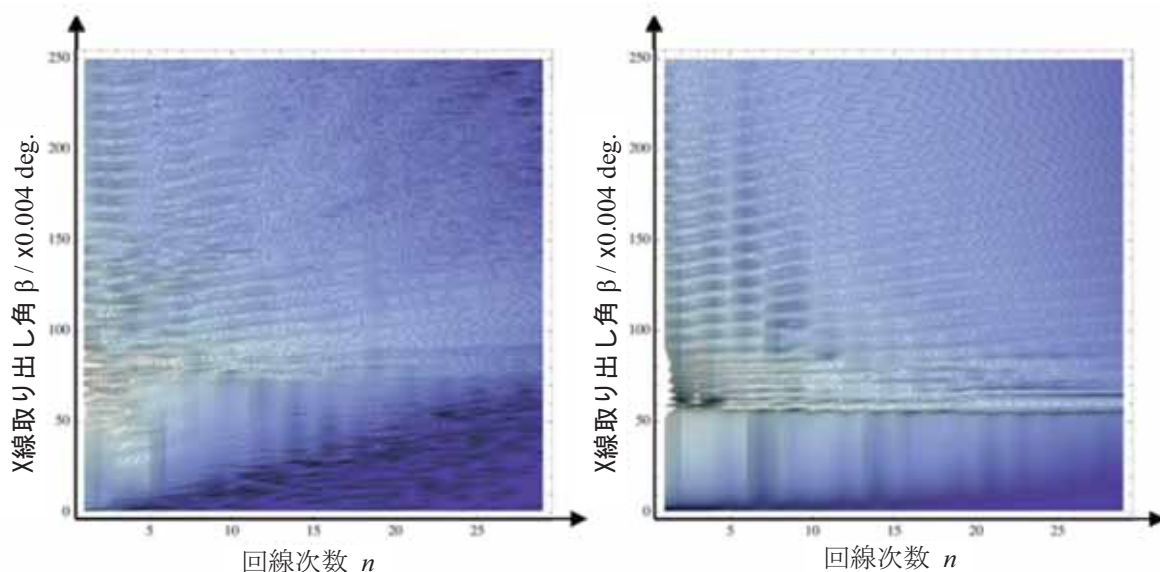


図2. 得られたX線強度二次元分布。(左)実験, (右)シミュレーション

結果および考察：

得られた測定データを解析し、デバイスパターンの形状パラメータを求めるため、表面X線散乱における反射や屈折の効果を考慮した散乱理論DWBA (distorted wave Born approximation)に基づき、表面ナノ形状からの散乱強度を計算するための定式化を行った[2]。今回測定した試料はシリコン基板表面に一次元的なグレーティングが形成された構造になっている。そこで、その断面形状を図3に示すようにモデル化し、グレーティングの高さと幅および側壁角度、さらに上下それぞれのラウンディング径などをパラメータにして実験データを再現するようなパラメータの最適化を行った。

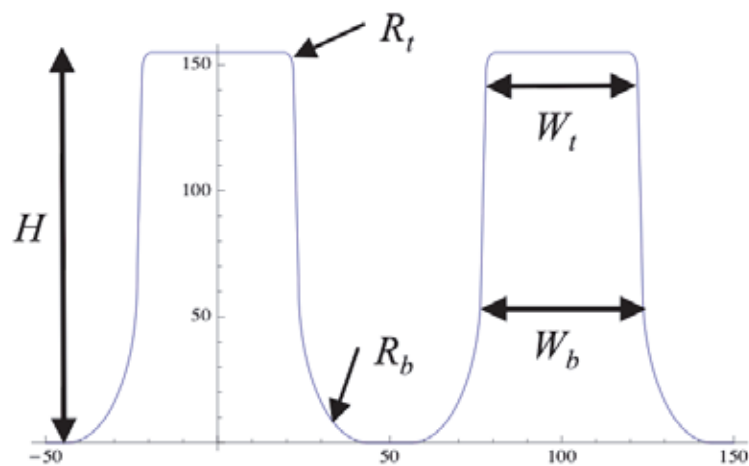


図3. 散乱強度を計算するために用いたグレーティングの断面形状モデル

これらの形状パラメータを最適化することによって計算したX線散乱強度の二次元分布を図2右に実験データと比較し易いように示した。出射角(Q_z)方向の強度振動はグレーティングの高さを反映した干渉縞で、そのピーク位置が高次の反射になるにしたがい湾曲しながら高角方向に伸びている。これは、単なる側壁角度の傾きでは現れず、図3で示す R_t や R_b のようなラウンディ

ングを考慮して初めて説明できることがわかった。つまり、X線散乱法は、CD-SEMのような上から見る方法ではわからない底部のラウンディングに関する情報が得られることが明らかになった。さらにこの図3では表されていないが、ライン中心位置の乱れや線幅の揺らぎなど、LERと関連するパラメータもX線のコヒーレント長程度の領域で平均化された値が得られる点も重要である。これらの情報は、高次回折線の減衰の様子から定量的に求めることができる。このようにして得られた構造パラメータを表1に示す。ここで、 σ_L , σ_W , σ_H はそれぞれ、ライン中心位置、線幅、高さの平均の乱れ(rms)を表している。

表 1. X線散乱データから得られたグレーティング構造の形状パラメータ

W_t (nm)	W_b (nm)	R_t (nm)	R_b (nm)	H (nm)	σ_L (nm)	σ_W (nm)	σ_H (nm)
44	49	2.5	20	165	1.2	0.75	2.2

参考のため、このようにして得られた断面形状を改めてSEM像と並べて図4に示す。SEMは、必ずしも十分な分解能ではないが、それでも両者を比較すると、非常によく一致しているように見える。

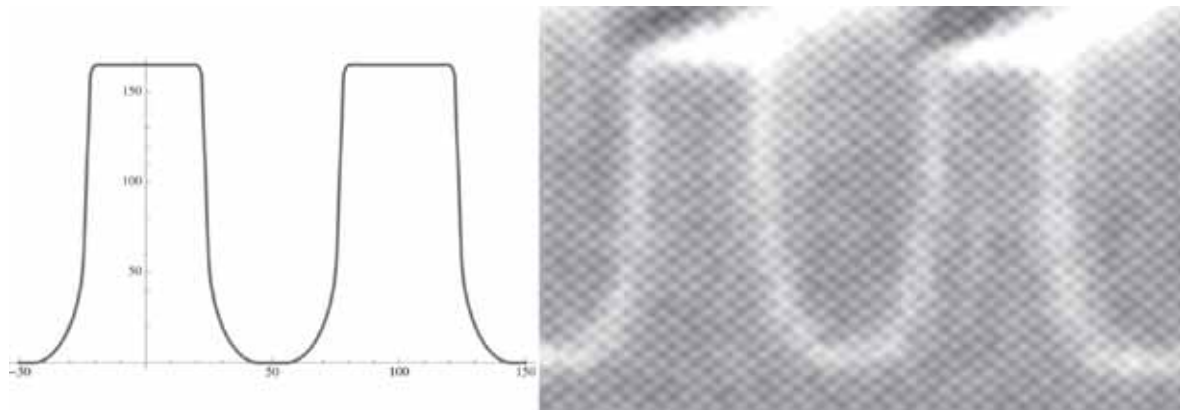


図 4. X線散乱強度を最適化して得られた断面形状とSEM像との比較

今後の課題：

以上、放射光を用いたGIXS法によって得られた二次元的なX線散乱強度分布から、基板表面に形成されたグレーティングの断面形状を測定することに成功した。今後、二次元検出器の採用による測定時間の短縮や、断面TEMとの詳細な比較による本方法の精度や感度に関する検証を進めていく。また、さらに複雑な構造や今後のデバイスの細線化に伴う、10 nmオーダーの線幅を持つ微細な構造の評価等を進めると共に、半導体製造ラインでも使える装置の開発も進めていく計画である。

参考文献：

- [1] Y. Nakayama, Jpn. J. of Appl. Phys. **44**, 5586 (2005).
- [2] K. Omote, et al., Transactions of the Mat. Res. Soc. of Jpn. **33**, 535 (2008).