

X線散乱法による半導体デバイス形状計測法の開発 Development of Cross-sectional Profile Analysis for Semiconductor Device Patterns by X-ray Scattering Metrology

伊藤 義泰^a, 表 和彦^a, 樋口 明房^a, 中山 義則^b
Yoshiyasu Ito^a, Kazuhiko Omote^a, Akifusa Higuchi^a, Yoshinori Nakayama^b

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

微細化の進む半導体デバイスにおいて、繰り返し周期のピッチ幅はもちろん、線幅や高さ、また、側壁角度やラウンディング径などの断面形状パラメータを制御・計測することが大きな課題となっている。本実験では、エッチング条件を変えて作成した断面形状の異なる二種類の半導体デバイスに対して表面 X 線散乱法を適用し、その散乱パターンからそれぞれの断面形状を解析した。得られた断面形状は、断面 SEM 観察の結果と比較的良好一致し、表面 X 線散乱法が半導体デバイスの新しい形状計測法として有効であることを示した。

キーワード： Grazing incidence small-angle x-ray scattering (GISAXS), Critical dimension (CD), Nanostructure, Device pattern, Cross-sectional profile

背景と研究目的：

半導体デバイスの微細化はとどまることを知らず、ITRS（国際半導体ロードマップ）が予測する MPU（マイクロプロセッサ）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 からそれ以下のサイズも視野に入れられている。また、磁気ディスクにおいても、記録容量の高密度化を目指し、ディスクリートトラック型のデバイス開発が進められている。このようなナノスケールの微細化において、数ナノメートルの形状の乱れがデバイス性能に大きな影響を与えることが指摘されており、ナノメートルオーダー以下の精度でデバイスの形状を制御することが重要だと考えられている。それと同時に、その形状を非破壊で精度良く計測することも大きな課題となっている。現在、半導体デバイスの形状検査装置に CD-SEM（Critical-dimension scanning electron microscopy）が広く利用されているが、CD-SEM はデバイスの表面側（真上）から観察する手法であり、デバイスの断面形状を計測するには適さない。特に、デバイスが逆テーパの形状を有する場合（デバイスの表面側の形状が基板界面側の形状より大きい場合）、表面側の形状がブラインドとなり基板界面側の形状を計測することは事実上不可能である。また、CD-SEM の電子ビーム径は数ナノメートルで、微小な形状の変化を感度良く測定するには限界がある。

ナノスケールのデバイスに X 線を照射すると、散乱角度の小さい領域に、デバイス形状に対応した小角散乱パターンを観測することができる。このとき、X 線の波長は 0.1 nm 程度とデバイスの形状より十分小さく、微小な形状変化に対して高い感度を持つことが期待される。また、表面すれすれに X 線を入射する反射配置の GISAXS（Grazing incidence small-angle x-ray scattering）を適用すると、表面から基板界面までの感度を飛躍的に高めることができると期待される。

本研究では、上記表面 X 線散乱法の有効性に着目し、新しい断面形状計測法を確立すべく実験を行った。

実験：

断面形状の異なる二種類の半導体デバイスの形状計測を行った。これらは、ピッチ幅が 100 nm の表面回折格子（グレーティング構造）の基本構造を持ち、一つは断面形状がほぼ矩形で、もう一つは意図的なオーバーエッチングプロセスにより基板界面にノッチ形状を持つ。図 1 に、これらの断面 SEM 観察像を示す。

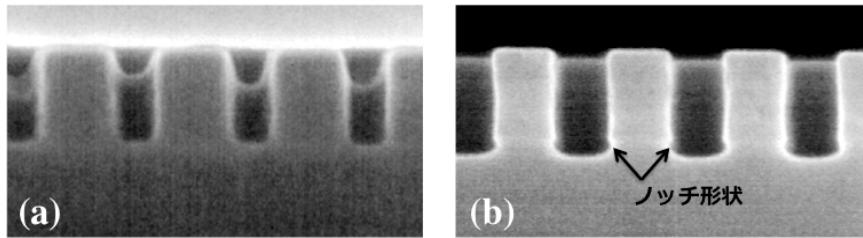


図1. 半導体デバイスの断面 SEM 観察像。

(a) 断面が矩形形状の半導体デバイス. (b) 基板界面がノッチ形状の半導体デバイス.

実験は、SPring-8 BL46 XU ビームラインで行った。測定には多軸回折計を用い、試料表面すれすれに X 線を入射する反射配置の GISAXS を採用した。入射 X 線のエネルギーを 9.0 keV、X 線入射角度を全反射臨界角度近傍の 0.3° に設定した。また、検出器には二次元検出器である PILATUS 100K を用いた。このとき、試料から二次元検出器までの距離を 930 mm に設定した。測定中は、表面面内回転角度を -1° から 12° まで走査し、100 nm ピッチの回折条件を満足した回折 X 線を二次元検出器で計測した。図 2 に、PILATUS 100K 検出器で得られた二次元散乱パターンを示す。

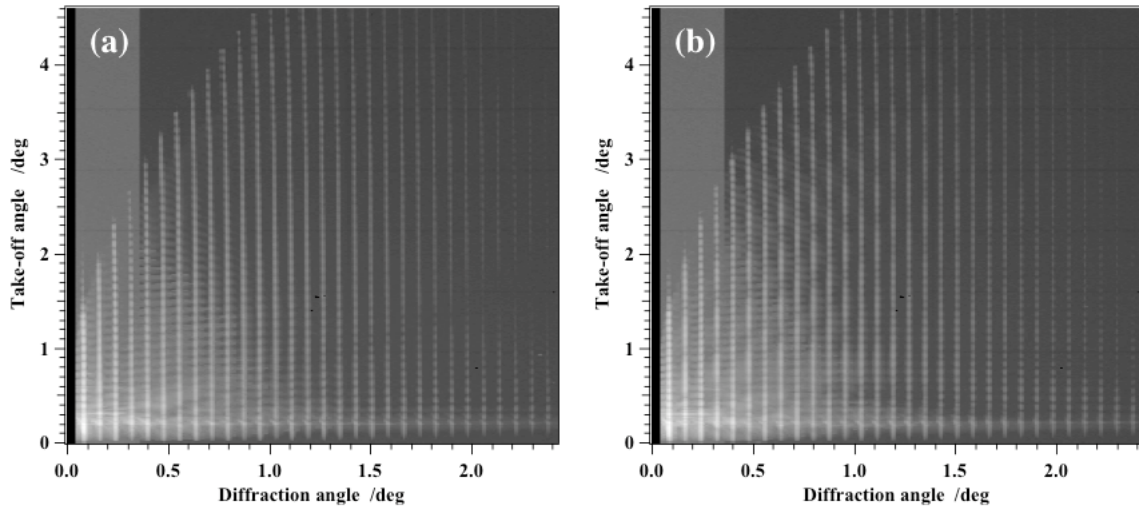


図2. PILATUS 100K 検出器で得られた二次元散乱パターン (Log₁₀ スケール)。

(a) 断面が矩形形状の半導体デバイス. (b) 基板界面がノッチ形状の半導体デバイス.

図 2 を見ると、表面面内方向 (図 2 の横軸方向) に 100 nm ピッチに対応した回折線が 1 次線から 30 次線まで観測されているのが分かる。また、各回折線の出射角度方向 (図 2 の縦軸方向) には振動構造を持つ特徴的な散乱パターンが得られている。図 4 に各回折線を出射角度方向に切り出した散乱パターンを示す。低次の回折線は、回折条件と表面面内回転角度量の関係から観測できる出射角度範囲が狭くなっている。最も周期の短い振動の基本周期はグレーティングの高さを反映している。また、回折次数 (回折角度) によってこの振動の位相や振幅が変化している (周期もわずかに変化している)。これら振動構造の回折次数依存性は、線幅や側壁角度やラウンディング径などの形状を反映している。基板界面にノッチ形状を持つ半導体デバイスからの散乱パターンでは、さらに長周期の振動が観測されている。この長周期の振動の基本周期はノッチ形状の高さを反映している。この長周期の振動も回折次数によって位相や振幅が変化している (例えば、1 次線や 3 次線や 5 次線では長周期の振動はほとんど観測されていない)。長周期の振動の回折次数依存性はノッチ部分の形状を反映していると考えられる。このように、表面 X 線散乱は、断面形状に対して感度があり、散乱パターンを解析することによって、これらの形状パラメータを求めることができる。

結果および考察：

散乱パターンから断面形状を直接決定するためには、形状因子 (電子数密度分布のフーリエ変換) の位相が不可欠である。しかしながら、反射配置の GISAXS では、表面界面における屈折や

多重反射の影響が大きく、散乱強度から形状因子の位相を決定するのは必ずしも容易ではない。そのため、断面形状をモデル化し、モデルパラメータを用いて計算される散乱パターンと実験で観測した散乱パターンが一致するようにモデルパラメータを最適化し、断面形状を求めることにした。また、散乱強度計算では、屈折や多重反射の効果を考慮した DWBA (Distorted wave Born approximation) 法に基づいて散乱を記述した^[1-3]。図 3 に、解析に用いた断面形状モデルを示す。

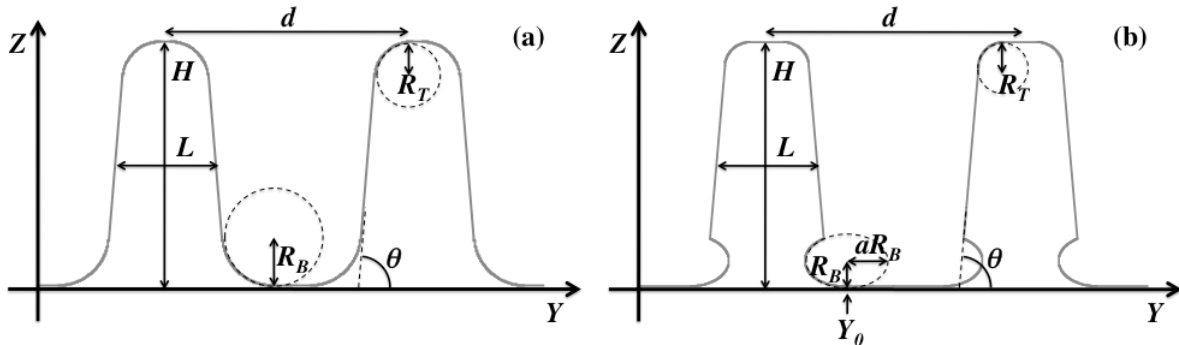


図 3. 解析に用いた半導体デバイスの断面形状モデル。

(a) 断面が矩形形状の半導体デバイス. (b) 基板界面がノッチ形状の半導体デバイス.

共通のパラメータは、ピッチ幅 d 、線幅 L 、高さ H 、側壁角度 θ 、円曲線で近似したトップラウンディング半径 R_T である。断面が矩形形状のモデルでは、その他に円曲線で近似したボトムラウンディング半径 R_B がある。基板界面にノッチ形状があるモデルでは、ボトムラウンディング部分を楕円で当てはめ、パラメータとしては高さ方向の半径 R_B と楕円の扁平率 a (面内方向の半径は aR_B) と楕円の中心位置 Y_0 とした。また、ナノメートルスケールの微細化では数ナノメートルの形状の乱れがデバイス性能に大きな影響を与えることが指摘されており、乱れの計測も大きな課題である。そこで、上記のパラメータの他に、ピッチの中心位置乱れ σ_p 、線幅の乱れ σ_L 、高さの乱れ σ_H を導入して散乱を記述した。これらの乱れのパラメータは、ランダムなガウス分布を仮定した rms 値である。図 4 に、実験結果とパラメータを最適化したときの計算結果を示す。また、図 5 に最適化された形状パラメータで計算される断面形状と断面 SEM 観察を比較した結果を、表 1 に最適化された形状パラメータと乱れのパラメータの値を示す。

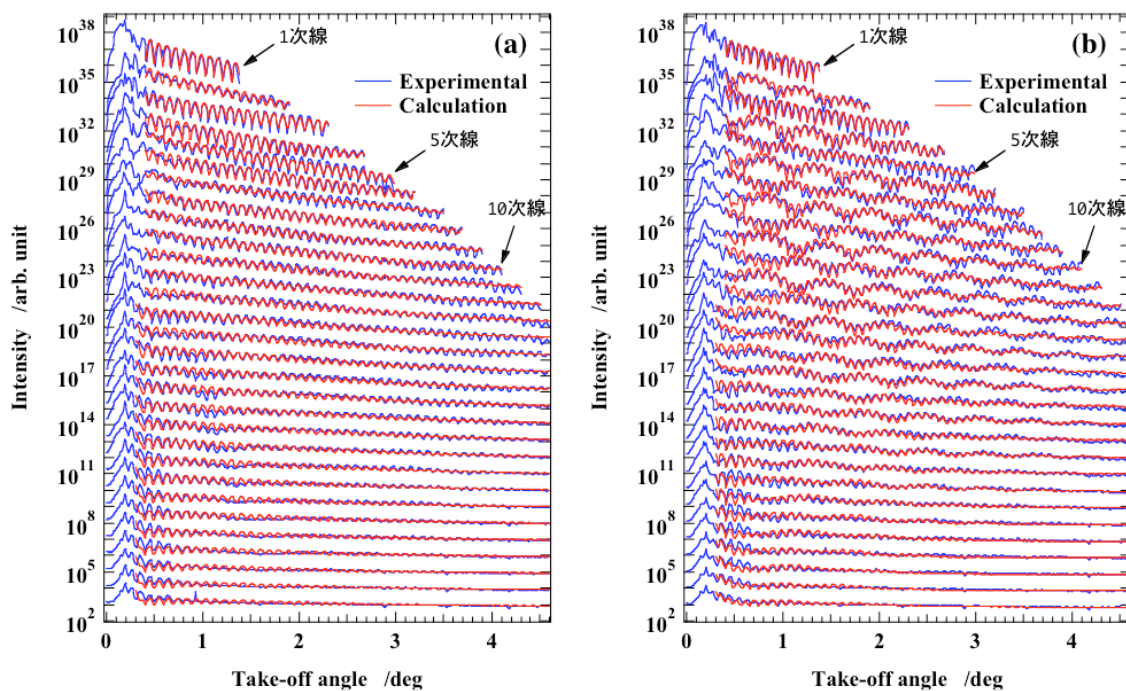


図 4. 出射角度方向に切り出した各回折線の実験散乱パターンと計算結果。

(a) 断面が矩形形状の半導体デバイス. (b) 基板界面がノッチ形状の半導体デバイス.

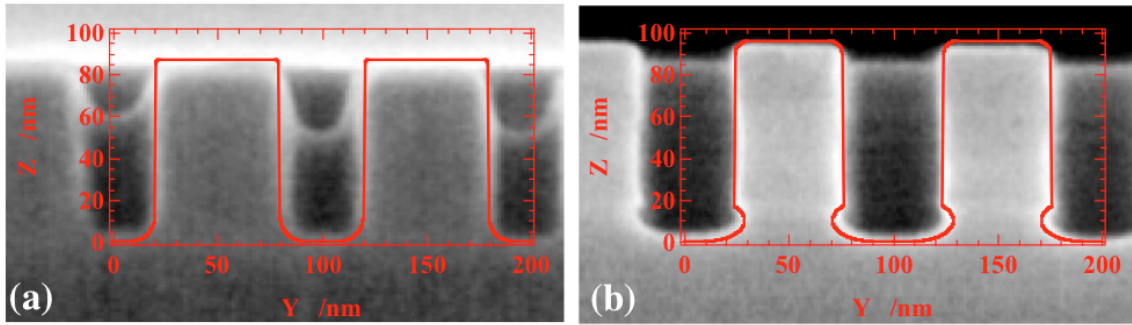


図 5. 断面 SEM 観察と表面 X 線散乱法で得られた半導体デバイスの断面プロファイル。
 (a) 断面が矩形形状の半導体デバイス. (b) 基板界面がノッチ形状の半導体デバイス.

表 1. X 線散乱法の解析で得られた断面形状と乱れのパラメータ

半導体 デバイス	d (nm)	L (nm)	H (nm)	θ (deg)	R_T (nm)	R_B (nm)	a	Y_0 (nm)	σ_P (nm)	σ_L (nm)	σ_H (nm)
矩形形状	99.78	59.6	86.96	89.5	2.0	11.5	-	-	1.9	1.8	0.51
ノッチ形状	99.76	52.1	95.98	89.5	6.5	10.1	1.9	90.3	1.9	1.0	0.49

表面 X 線散乱法で得られた半導体デバイスの断面形状は、断面 SEM 観察の結果と比較的良好一致していることが分かる。どちらかと言うと、断面 SEM 観察像の輪郭がぼやけており、わずか数ナノメートルのラウンディング径やノッチ形状を観察するのに断面 SEM 観察ではもはや不十分だと考えている。そのため、現在、断面 TEM 観察の実験も進めている。

ここまで述べてきたように、表面 X 線散乱法を用いて、半導体デバイスの断面形状を非破壊で評価できることを示した。特に、表面の真上から観察する CD-SEM では、基板界面付近のノッチ形状を検出すること自体困難であるが、表面 X 線散乱法を用いることにより、ノッチ形状まで感度良く評価できることを示した。また、平均の断面形状だけでなく、デバイス特性に影響を与えると考えられる乱れのパラメータも評価できることを示した。

今後の課題：

以上、放射光を用いた表面 X 線散乱法で、半導体デバイスの断面形状計測を実現し、その感度の高さや有効性を示した。本実験は、二次元的な断面形状計測を実現したものであるが、今後の半導体デバイスはフィン型電界効果トランジスタやピラー構造を持つ三次元デバイスに移行すると考えられる。三次元立体構造を評価する場合、様々な方位から X 線を入射して得られる散乱パターンから形状を再構成する必要がある。そのため、さらに新しい測定手法や解析手法の開発に力を入れていく必要があると考えている。

参考文献：

- [1] S. K. Sinha, et al., Phys. Rev. B **38**, 2297 (1988)
- [2] K. Omote, et al., Appl. Phys. Lett., **82**, 544 (2003)
- [3] K. Omote, et al., Proc. of SPIE **7488**, 74881T (2009)