

X線散乱法による超微細 25 nm ピッチ標準パターンの形状計測 Measurement of 25-nm pitch Line/Space pattern by X-Ray Scattering

伊藤 義泰^a, 表 和彦^a, 岡崎 祐子^a, 中山 義則^b
Yoshiyasu Ito^a, Kazuhiko Omote^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側壁(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、 $1\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ の領域に形成された、ピッチ幅が 25 nm の超微細一次元表面回折格子(Line/Space)に対して表面 X 線散乱法を適用し、その側壁断面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た。実験で得られた散乱パターンを上記の形状パラメータを用いたモデルによって計算される散乱パターンと比較し、形状パラメータを最適化することにより、微細なパターンの断面形状を非破壊で測定することに成功した。

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

背景と研究目的：

半導体デバイスの形状検査装置として、CD-SEM (Critical dimension scanning electron microscopy) が広く用いられている。CD-SEM で正しい寸法を与えるためには、倍率を校正するためのピッチ幅の値付けされた一次元表面回折格子の標準試料が必須である。これまで、ピッチ幅が 240 nm, 100 nm の標準試料が実用化され[1], そのピッチ幅の値付けは深紫外の波長領域で行われてきた[2]. 一方で、半導体の微細化はとどまることを知らず、MPU 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、このようなナノ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いる。一方で、数ナノメートル径の電子ビームで得られる CD-SEM 像から数ナノメートル以下の分解能で形状を計測するには限界があり、もはや倍率校正だけでなく、CD-SEM 像から真の形状へ校正するための側壁形状(高さ、側壁角度、ラウンディング径など)が既知の側壁標準試料の開発・実用化も要求されている。また、それと同時に、非破壊で側壁形状を評価する計測法の確立も望まれている。

このような背景のもと、ピッチ幅が 50 nm 以下の標準試料製作は電子ビーム露光によっても困難であるため、以下のような全く新しい方法で 25 nm ピッチの表面回折格子(グレーティング)を作成した。はじめに、シリコン基板上に、シリコン(10 nm)/酸化シリコン(15 nm)の多層膜を 40 層成膜する(総膜厚 $1\ \mu\text{m}$)。次に、この多層膜を劈開し、劈開面を研磨後、溝の深さが 30 nm 程度

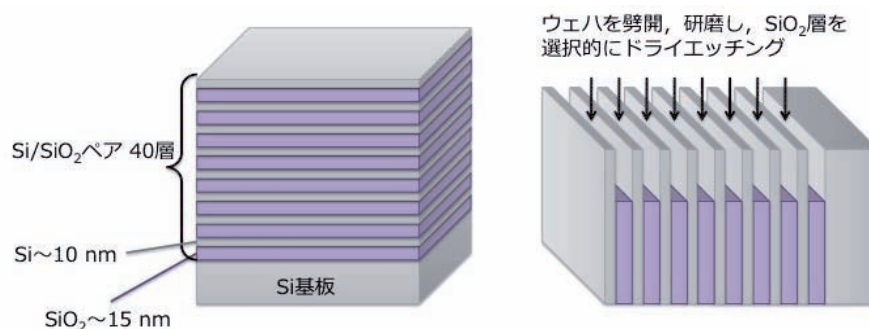


図 1. 25 nm ピッチ超微細 Line/Space の作成方法

になるように酸化シリコンを選択的にドライエッチングする。この方法により、劈開表面にシリコンの膜厚の線幅を持つ Line/Space が形成される(図 1)[3]。ただし、多層膜の断面を劈開して得られた構造のため、 $1\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ の極めて細長い領域にグレーティングが形成されている。さらに、このように微細なピッチ $25\ \text{nm}$ の寸法は、もはや深紫外の波長領域でも測定が不可能であり、波長の遙かに短い X 線による測定が有効であると考えられる。そのことを実証し、ナノ形状計測の新しい方法を開発するため、SPring-8 の強力な X 線源を用いて、上記試料の断面形状計測を試みた。

実験：

上記、ピッチ幅 $25\ \text{nm}$ のグレーティングが $1\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ の領域に形成された試料を SPring-8 BL46XU で測定した。入射 X 線のエネルギーは $9.5\ \text{KeV}$ であった。表面 X 線散乱の測定では、劈開表面すれすれに X 線を入射する反射配置を用いた(GISAXS: Grazing incidence small-angle x-ray scattering)。このとき、X 線入射角度は全反射臨界角度近傍の 0.24° に設定した。検出器には、二次元検出器である PILATUS100K を用いた。測定中は試料を表面に垂直な回転軸を中心に走査し、グレーティングによる回折条件を満たした回折 X 線を二次元検出器で計測した。

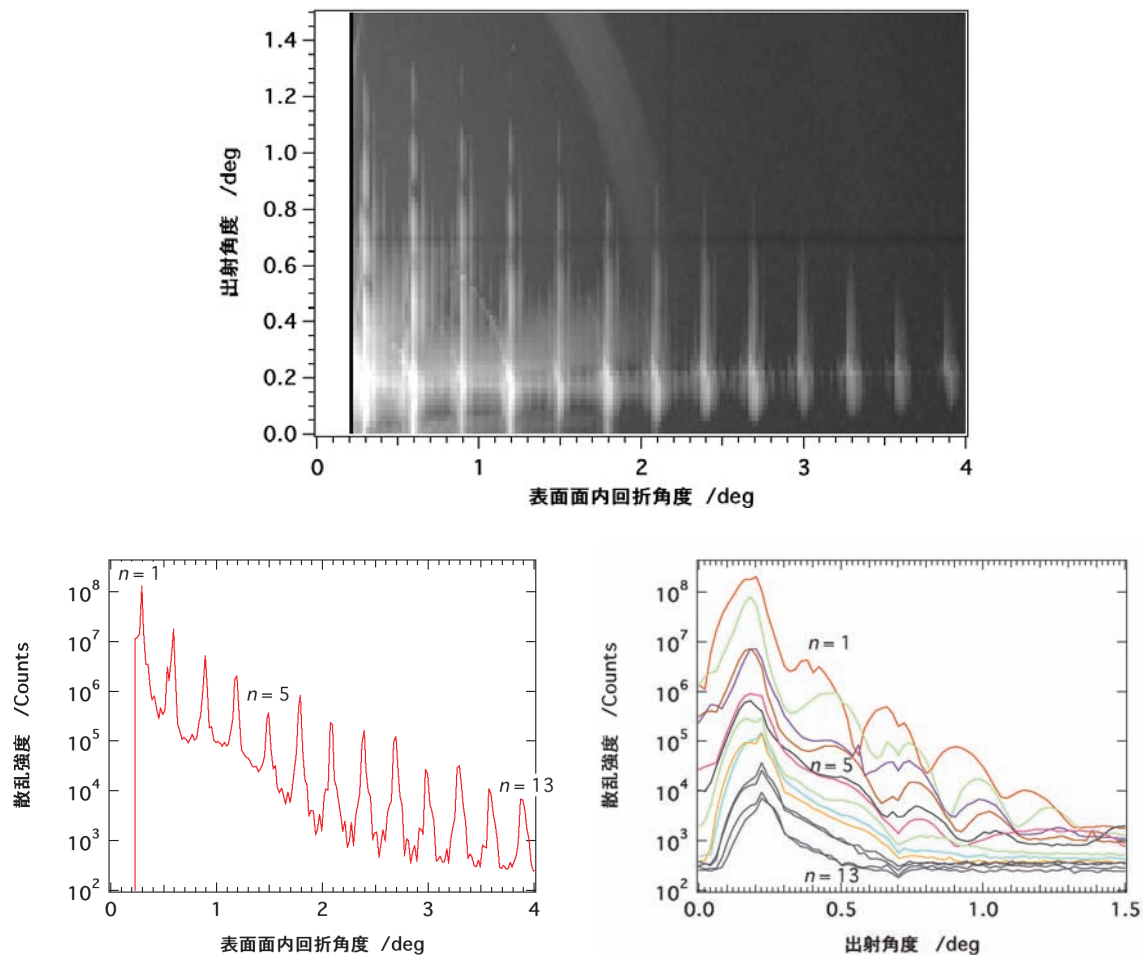


図 2. $25\ \text{nm}$ ピッチ超微細 Line/Space の表面 X 線散乱測定. (上)PILATUS 100K で得られた二次元散乱パターン. (左下)出射角度 0.24° で切り出した表面面内方向の回折パターン. (右下)各回折線の出射角度方向の散乱パターン.

図2に、25 nm ピッチ超微細グレーティングから得られた表面散乱パターンを示す。図2を見ると分かるように、 $1\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ と非常に細長い変則的な領域からでも SPring-8 の強力な X 線を用いることにより、ダイナミックレンジ 6 桁のシグナルが得ることができた。得られたデータについて述べる。まず、表面面内方向には、25 nm ピッチの周期構造に対応した回折 X 線が 13 次まで観測されている。回折強度の回折次数依存性を解析することにより、線幅、ピッチの中心位置乱れ、線幅の乱れ等の形状パラメータが得られる。また、各回折線の出射角度方向にはフリンジパターンが観測されている。このフリンジの基本周期は、グレーティングの高さ（溝の深さ）に対応する。また、回折次数 n が大きくなるにしたがって、このフリンジの周期、位相、振幅が変化している。これは、グレーティングの側壁角度や上下のラウンディング径等の形状パラメータを反映しており、このフリンジ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。

データ解析および結果：

グレーティングの側壁断面形状を決定するため、ピッチ幅 P_W 、線幅 L_W 、高さ（溝の深さ） H 、側壁角度 θ 、ボトムラウンディング径 R_B 、トップラウンディング径 R_T を形状パラメータとして X 線回折強度を計算し、実験と計算の回折強度が一致するようにこれらのパラメータの最適化を行った。また劈開表面にあるグレーティングからの散乱を効率的に測定するため、微小角入射の実験配置を採用した。そのため、回折強度の計算には、表面や界面での X 線の屈折・反射効果を統一的に扱う DWBA(Distorted wave Born approximation)法を用いた[4][5]。また、ナノスケールまで微細化した半導体デバイスでは、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いるため、乱れの計測も重要な課題となっている。そこで、上記の形状パラメータの他に、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。X 線の回折強度は、これらの構造みだれにも敏感であるため、データ解析におけるこれらのパラメータの導入は極めて自然である。ただし、これらの値はランダムなガウス分布を仮定した rms での値である。図3に、実験結果と最適化した形状パラメータを用いて計算した各指数の回折強度の比較を等高線プロットで示す。また、図4に最適化したパラメータ計算される側壁断面形状を、表1に最適化で得られた各形状パラメータの値を示す。出射角方向の干渉パターンが、回折次数の増加にともなって徐々に高角側へシフトしていく様子がよく再現されている。

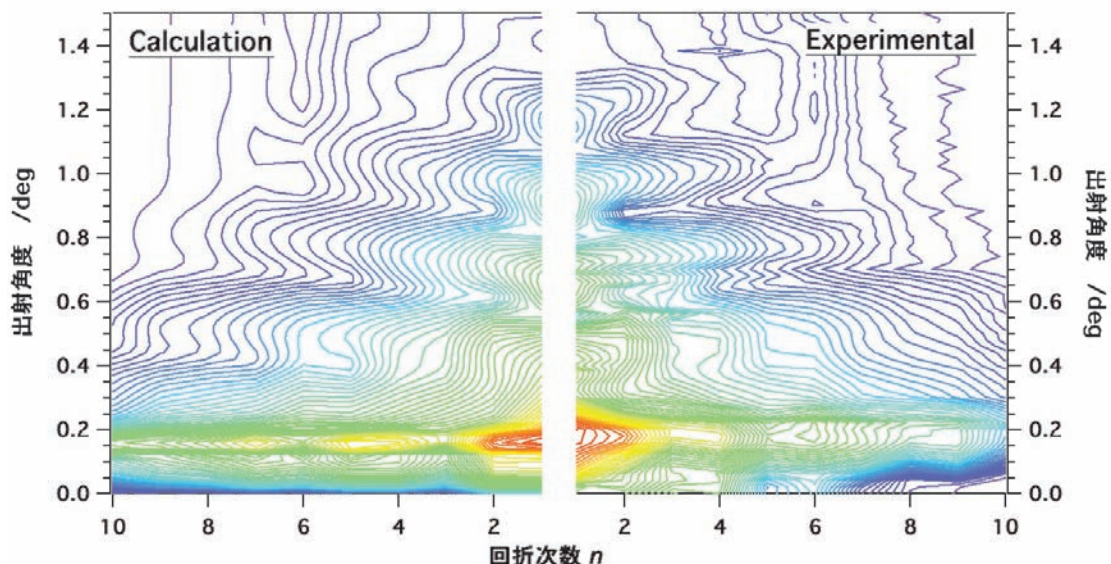


図3. X 線散乱強度の二次元分布. (左)計算. (右)実験

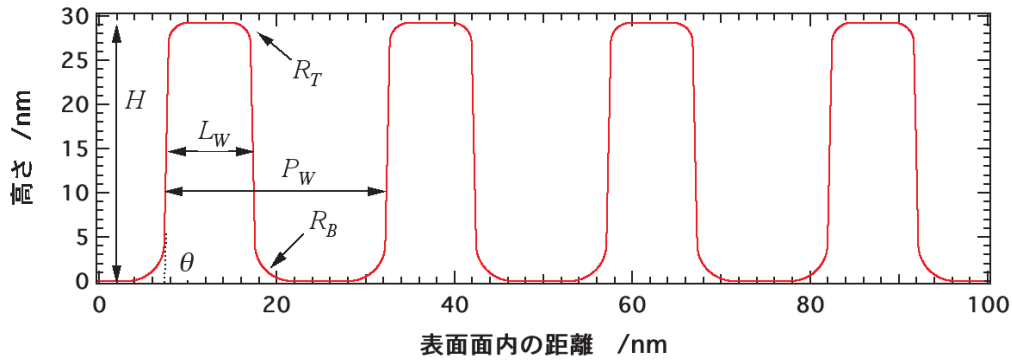


図 4. 表面 X 線散乱の解析で最適化されたパラメータで計算される側壁（断面）形状

表 1. X 線表面散乱の解析で得られたパラメータの一覧

P_W (nm)	L_W (nm)	H (nm)	θ (deg)	R_B (nm)	R_T (nm)	σ_p (nm)	σ_L (nm)	σ_H (nm)
24.88	9.8	29.24	88.7	4.2	2.2	0.4	0.7	0.8

CD-SEM の電子ビーム径は数ナノメートルと有限であり、また、表面の上から観察するため、CD-SEM でラウンディング径のような微小な形状を評価することは非常に難しい。一方、今回の X 線による方法では、試料を破壊することなく、線幅や高さや側壁角度はもちろん、わずか数ナノメートルのラウンドディング径についても評価することができた。さらに、平均の形状を与えるだけでなく、乱れのパラメータも得られた。

今後の課題：

以上述べてきたように、表面 X 線散乱法を用い、 $1 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$ のエリアに形成された 25 nm ピッチ超微細グレーティングの側壁断面形状計測を放射光により実現した。このような断面形状を精度良く計測する手法の一つに、破壊分析である断面 TEM があげられる。今後、測定した試料の断面 TEM 撮影をおこない、両者の結果を詳しく比較する予定である。また、今後の実験室線源を用いた装置の開発も視野に入れ、半導体を始めとする各種デバイスの形状計測の分野で、表面 X 線散乱法が有効となるよう、さらに測定・解析方法に関し検討を進めていく必要がある。また今後、一次元グレーティングだけでなく、ピラー構造やフィン型電界効果ドランジスタなどのような二次元的な構造評価も必要になってくると考えられる。その場合、単なる二次元的な断面形状計測だけでなく、さまざまな方向や位置においてスライスした三次元的な断面形状計測が必要となる。これらの課題を実現するためには、さらに新しい測定および解析方法の開発にも力を入れる必要があると考えられる。

参考文献：

- [1] Y. Nakayama, Jpn. J. Appl. Phys., **44**, 5586 (2005)
- [2] J. Kitta, et al., Second International Symposium on Standard Materials and Metrology for Nanotechnology, pp. 80-87 (2006)
- [3] Y. Nakayama, et al., SPIE 7272 (2009) 727224-1
- [4] S. K. Sinha, et al., Phys. Rev. B **38**, 2297 (1988)
- [5] K. Omote, et al., Appl. Phys. Lett., **82**, 544 (2003)