

# 軟 X 線回折の波長依存性を用いた厳密な 3 次元断面形状計測 Rigorous 3D cross-sectional profiling using wavelength dependence of soft x-ray diffraction

星野鉄哉<sup>1</sup>, 青木貞雄<sup>1</sup>, 伊藤雅英<sup>1</sup>, 井藤浩志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>筑波大学イノベティブ計測技術開発研究センター,  
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>2</sup>産業技術総合研究所物質計測標準研究部門,  
〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

Tetsuya HOSHINO<sup>1,\*</sup>, Sadao AOKI<sup>1</sup>, Masahide ITOH<sup>1</sup>, and Horoshi ITOH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R&D Center for Innovative Material Characterization, University of Tsukuba,  
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, 305-8573, Japan

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1  
Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

We have shown that measuring the 3D cross-sectional shape of a rectangular lattice using a wavelength distribution can achieve a resolution equivalent to that of an angular distribution. Even if the angular range to be measured is narrow, in principle it is possible to measure a lattice several times the size of the wavelength.

## 1 はじめに

2次元・3次元形状の計測の光学原理の主流は、線形近似と幾何光学、フラウンホーファー近似・ボルン近似とフーリエ光学の二つである。これらの原理は、形状と、散乱パターンや結像が一对一に対応しており、さらに、解析が容易であることから、X線 CT やタイコグラフィ、各種結像等で広く使われている。

ここ40年間の厳密な光学計算技術の発展は、光計測の解析原理にも変革をもたらしつつある。散乱パターンを厳密に解析することで、3次元形状について、対象形状を二桁小さくし、分解能を二桁向上できると期待できる。その代表格が光波散乱計測 (Scatterometry) である[1]。この手法は、散乱パターンを計測し、厳密に計算したモデル形状の散乱パターンと対応させることで、元の形状を求める手法である。結像の焦点合わせの必要がないことで、高速に移動する微粒子や大面積基板の評価に使うと、処理速度の大幅な向上が見込める。分解能の高さとオンライン計測に向いている特徴から、微細化の進む半導体の計測には不可欠な計測方法となりつつある[2]。

現状では、計測対象は周期構造の格子に限られているが[2]、孤立構造にも適用することでその用途が大きく拡大すると予想される。このコンセプトに基づき、KEKのビームラインにおいて散乱の角度分布から孤立した格子の断面形状を計測してきた。

一つには、孤立形状特有の幅広の散乱パターン角度分布の解析方法の開発である[3]。もう一つは、試料の計測点の把握方法である[4]。さらに、格子内部での、コヒーレンスの低下も散乱パターンに大き

な影響を及ぼすことから、これを考慮する手法についても検討した[5]。

その結果、X線においては、周期構造の分解能に迫る、2波長の3次元分解能で、1 $\mu$ m幅の格子の断面形状のサイズを得た[3,4]。理論的には、さらに、2桁の試料サイズの縮小と、1桁の分解能向上が実現できる[3]。しかし、軟X線の真空配管では、試料と、散乱パターンを計測するCCDの距離を10cm以下に短くすることが難しい。結果として、5°程度の角度範囲での計測に止まり、小さい試料を計測することができていない。

この問題を解決する手段の一つは、大きい散乱角度について、波長分布の計測を行う手法である[6]。波長分布の波長領域を広くとることで、狭い角度分布の計測であっても、試料サイズや分解能について、改善することができる。筆者らの知る範囲では、X線では、孤立系の波長分布からもとの断面形状・サイズを算出した例はない。ここでは、解析手法を開発し、波長分布による高分解能計測の例を示すことを目的とした。

## 2 実験

ビームライン BL-11D を用い、入射角度 4 1.6° の反射散乱光の角度分布を、波長を変えて計測した。波長は、試料上流側の備え付けの分光器を用い 8.89 nm から 1.6 nm まで変えた。これを元に、波長分布のデータを作成した。

試料は電子線リソグラフィで作成した、断面が矩形の格子状レジストパターンである。散乱計測の結果の妥当性評価のために、Atomic Force Microscope (AFM) で形状と表面凹凸を評価した。

### 3 解析方法

Fig.1 のモデルに基づいて散乱パターンを計算した。計算手法は孤立系の厳密結合波解析である[7]。

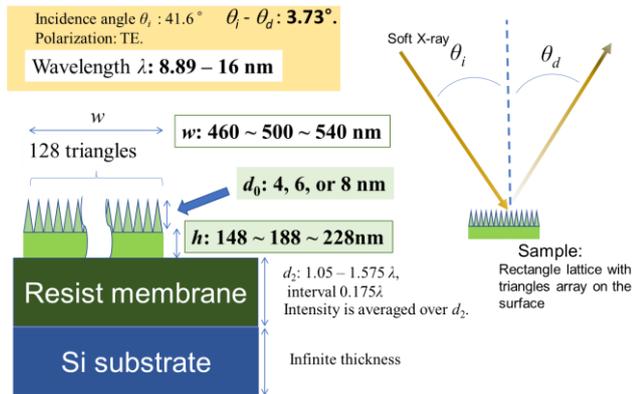


Fig. 1. Simulation model [8]

### 4 結果および考察

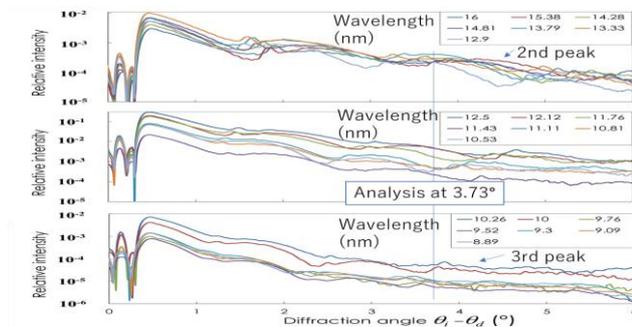


Fig. 2. Wavelength dependency [8]

角度分布スペクトルはFig.2のように、波長と共にピークの位置が変化した。(入射角  $\theta_i$  - 散乱の計測角  $\theta_d$ ) を  $3.37^\circ$  で固定して、Fig.3の波長分布を得た。このとき、角度分布の強度は  $0.53^\circ$  で規格化している。

角度分布の2次・3次の角度に対応する波長分布のピークに着目し、ピーク波長が一致するようにシミュレーションを行った (Figs.3, 4)。

その結果、幅は  $500\text{nm} \pm 20\text{nm}$ , 高さは  $188\text{nm} \pm 20\text{nm}$ , 矩形部表面の凹凸は  $6\text{nm} \pm 2\text{nm}$  と算出できた。

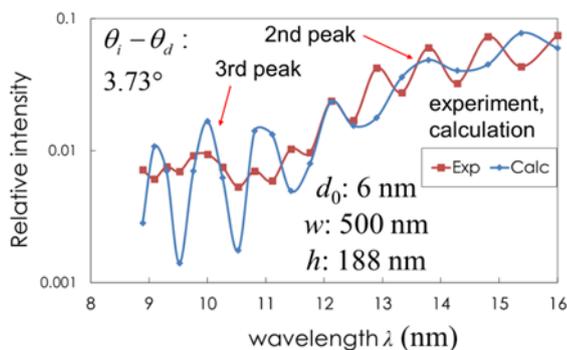


Fig. 3. Spectrum comparison [8]

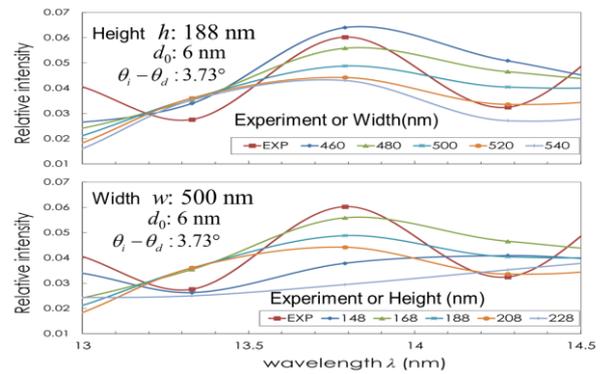


Fig. 4. Effect of width and height [8]

### 5 まとめ

波長分布の2次及び3次の回折ピークに着目することで、角度分布の解析と同等レベルの分解能が得られることが分かった。より高次の回折ピークを用いることができれば、対象サイズの一けた低減は可能である。

### 謝辞

渡辺紀生先生には、貴重な議論をいただきまして、ありがとうございました。KEKの間瀬一彦教授と菊地貴司専門技師には、BL-11Dの使用に際して大変お世話になりました。

### 参考文献

- [1] M. H. Madsen and P. E. Hansen, *Surface Topography: Metrology and Properties* **4(2)**, 023003 (2016).
- [2] N. Orji et al., *Nat. Electron.* **1(10)**, 532 (2018).
- [3] T. Hoshino, S. Aoki, M. Itoh et al., *Appl. Opt.* **59**, 8661 (2020).
- [4] T. Hoshino, S. Aoki, M. Itoh, H. Itoh et al., *Proceedings of DH 2022*, **W5A.20** (2022).
- [5] T. Hoshino, S. Banerjee, S. Aoki and M. Itoh, *Appl. Opt.* **60** (2021) 7765.
- [6] T. Hoshino, S. Banerjee, Y. Toyohiko and M. Itoh, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52(9S2)** 09LA05 (2013).
- [7] T. Hoshino, T. Yatagai, M. Itoh, *Opt. Express* **20**, 3954 (2012).
- [8] T. Hoshino, S. Aoki, M. Itoh, H. Itoh, *OPTICS and PHOTONICS International Congress (OPIC 2023) XOPTp-13* (2023).

\* hoshino.tetsuya.gt@u.tsukuba.ac.jp