

コヒーレントな軟 X 線の散乱・集光の計測 Diffraction and focusing of coherent soft X-rays

星野鉄哉, 青木貞雄, 伊藤雅英
数理物質科学研究科 筑波大学

〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

Tetsuya HOSHINO* Sadao AOKI and Masahide ITOH
Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, 305-8573, Japan

柱状構造や多数の穴を同心円状に持つ基板について、光散乱と集光の計測を行った。光散乱は高精度 3 次元計測につながる、光軸方向を含む断面形状の計測・解析である。また、集光は準結晶ホールアレイを用いたものであり、回折限界を超える集光が期待できる。これらの計測のポイントとなったコヒーレンス制御の手法について報告する。

1 はじめに

光散乱と集光のパターンの計測はそれぞれ独立に行ったが、将来的には、散乱パターンを集光して、弱い光でも計測することを目指している。ここでは、コヒーレント光散乱計測と準結晶集光パターンの計測について簡単に述べたのちに、コヒーレンス制御の手法について述べる。

軟 X 線のコヒーレント光散乱計測の解析は、フラウンホーファー近似を用いたものと、厳密なベクトル場理論を用いたものの 2 系統がよく用いられる。フラウンホーファー近似は、屈折レンズ等の結像と同原理であり、フーリエ変換で散乱・集光を記述できる。一方、厳密な計算を用いた手法は、スキヤタロメトリー（光波散乱計測）として知られており、散乱パターンから元の形状を予測する手法自身が研究対象となっている。

フラウンホーファー近似を用いた場合には、近接場の計算ができないため、光軸方向に厚さがある試料の形状解析で、精度を上げるのが難しい[1]。この点は、スキヤタロメトリーが優れており、文献と比較するとフラウンホーファー近似による解析より 2 桁高いサブ波長の精度での計測がされている。一方、スキヤタロメトリーの計算手法は周期構造に限定される RCWA(Rigorous Coupled-Wave Analysis: 厳密結合波解析)に限られてきた[2]。この理由としては、RCWA が遠方場を直接計算できることや内部構造を容易に考慮できることなどが挙げられる。我々は、格子の周期構造において、柱と柱の間隔を十分大きくすれば、一つの柱を孤立系として計測、計算することに着目し、試料構造の設計、およびシミュレーションを行った。孤立系の高精度 3 次元計測のキー技術である光軸を含む面内の断面形状計測を可能とするものである。

一方、準結晶集光パターンについては、準結晶ホールアレイを作成しコヒーレント光源を用いて集光

の確認を行った。用いた準結晶構造は、5 回回転対称の 2 次元ペンローズ・パターンの頂点に穴が開いたものである。準結晶ホールアレイはゾンプレートよりも集光効率は低いが、集光点での電場分布に異方性があり、また、光軸に沿って再帰的に集光するというユニークな特徴を持っている[3]。新しい集光手法への発展が期待できる。

これらの実験において、ポイントとなったのはコヒーレンスの制御である。必要なコヒーレンスは散乱体の大きさと散乱体から観測点までの距離で決まり、散乱体が大きいほど、また、この距離が短いほど、高いコヒーレンスが必要となる。入射光の光源として、ビームラインに既設の楕円ミラーの集光を用いた。コヒーレンスには、ビームラインの集光点と試料との位置関係も大きく関係しており、可視光では集光点の直後に試料を置くことで、コントラストの高い散乱パターンが得られることが分かっている[4]。一方、入射光のコヒーレンスは、高い計測感度があれば上げることができる。入射光の強度が弱くてもよい場合、入射側のスリットを狭めることでコヒーレンスを上げることができる。実験を行った BL-11D はコヒーレンスや光強度が必ずしも高くないので特に問題であった。ここでは高いコヒーレンスを保ちつつ、再現性の高い散乱パターンの計測を行う手法や、集光スポットの計測をする手法について報告する。

2 実験

2.1 試料

2.1.1 光散乱計測用の格子試料

弱い光で散乱光を計測するには複数の同じ柱に光を当てたほうが強度を稼げる。柱間の干渉効果は 20 波長以上柱間の距離を取ることで、実質的に無視できることが分かっている[5]。同じ形状・サイズの散乱体を、間隔において並べることで、孤立した散乱パターンを計測できる。集光径が 100 μm である

ので、図1のように、4つの柱に光が当たり、4倍の散乱強度となる。基材は窒化ケイ素 100 nm の膜の上に白金 200 nm が、接着層のクロムを介して蒸着されている。白金層の幅は 0.86 μm 、窒化ケイ素層の幅は 0.94 μm と異なっており、散乱光角度分布からそれぞれの幅を見積もることができる。白金層は誌面手前にあり、光は手前から奥に向けて入射された。

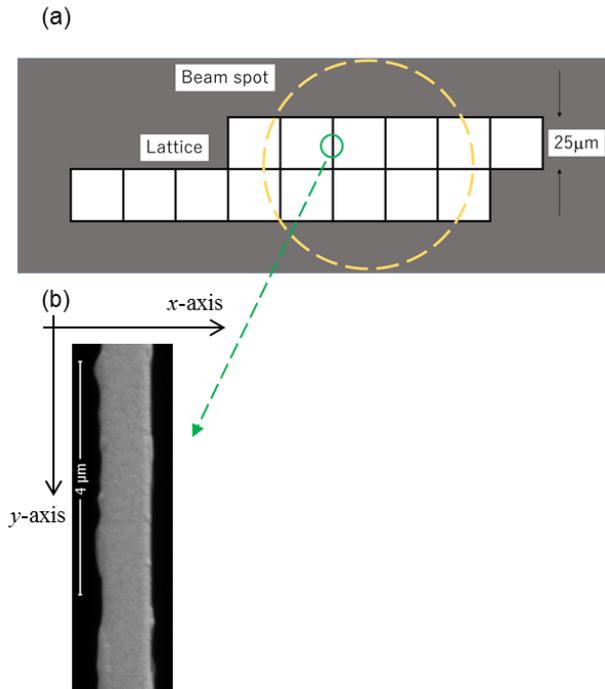


図1 格子形状とビームラインの集光スポット。
(a)格子概略図。(b)計測対象の縦の柱のSEM像

2.1.2 準結晶集光素子

図2は301穴の5回点对称準結晶ホールアレイである。基材は上述の光散乱計測用試料と同じである。

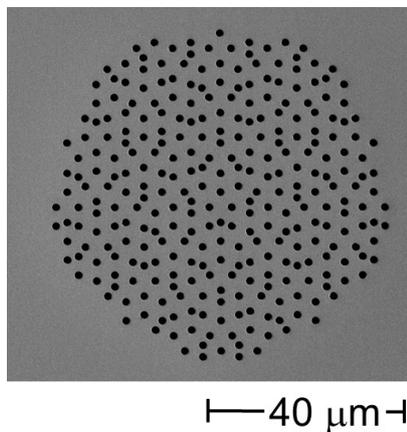


図2 準結晶ホールアレイのSEM像

2.2 計測方法

2.2.1 差動排気システム

高真空中にある集光ミラーの集光点に試料を配置するためには、ミラーと試料の間の真空差を短い距離で埋めることになる。試料室と集光ミラーの間に差動排気システムを、導入することでこれを実現できる。図3では、それぞれにポンプのついた3つのパーティションが、直径 2.5 mm の穴のある厚さ 10 mm の2つの両面フランジ(double sided flange)によって分離されている。TMP1に至る上流排気口と室内の圧力差をさらに拡大できるように、治具に内径 6 mm、長さ 80 mm のパイプを取り付け、T字管とパイプ取り付け治具の隙間をOリングで埋めた。使用した真空部品のサイズは ICF-70 規格に従う。ガスの流れやすさを示すコンダクタンス C は、穴の直径とその長さによって調整される。パイプの長さが l で、穴の半径が a の場合、 C は a^3/l に比例する[6]。ガスの流量を抑えることにより、上流排気口と試料室の圧力差が維持される。排気時間を 12 時間に設定して、差動排気システムがある場合とない場合の2つのケースの圧力を比較した。このシステムにより、上流の排気ポートの圧力が 6×10^{-5} Pa から 6×10^{-6} Pa に減少した。この結果、ビームラインに必要な真空条件を満たすことができた。

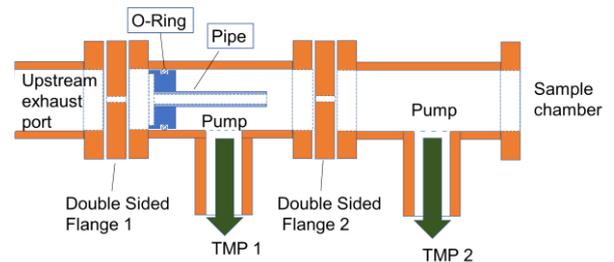


図3 差動排気システム。光は double sided flange 1 と pipe, double sided flange 2 の穴を通り、試料に届く。TMPは Turbomolecular Pump の略。

2.2.2 CCDによる集光点の高精度計測

集光点近傍で電場分布の様子を調べる方法として、ナイフエッジ法が広く使われている [7]。この手法は、集光点でのエネルギーの集中を利用しているため、準結晶のように集光面のエネルギーが分散している場合には使えない。一方、CCDで直接計測する手法は、感度が高く簡便であるが、CCD画素のサイズにその分解能が制約されていた。我々は、画素間に不感領域があることを利用して[8]、高精度計測を試みた。画素のサイズは 24 μm であったが、不感領域の幅は最大でも数 μm 程度であるため、一けた計測精度を上げることができる。CCDで直接観測することで感度が上がり、ビームライン上流のスリットの幅を 25 μm まで絞って、コヒーレンスを上げることができた。

3 結果および考察

図4は、垂直入射光に対する図1(b)の柱の散乱パターンである。64 sの計測でこのようにSN比の高い散乱パターンが得られた。図5は図2のホールアレイの集光点におけるパターンをCCDで計測した結果である。xyは直交座標、 y_m は試料位置を動かすXYステージのマイクロメータの読み。 $y_m = 4\mu\text{m}$ で信号強度が減少していることから、画素境界の不感領域に焦点の中心があることが分かる。

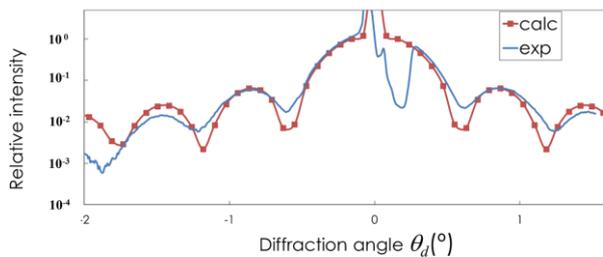


図4 垂直入射に対する、格子試料のy軸と直交する柱の回折パターン。散乱光角度分布の計算結果”calc”および実験結果”exp”。

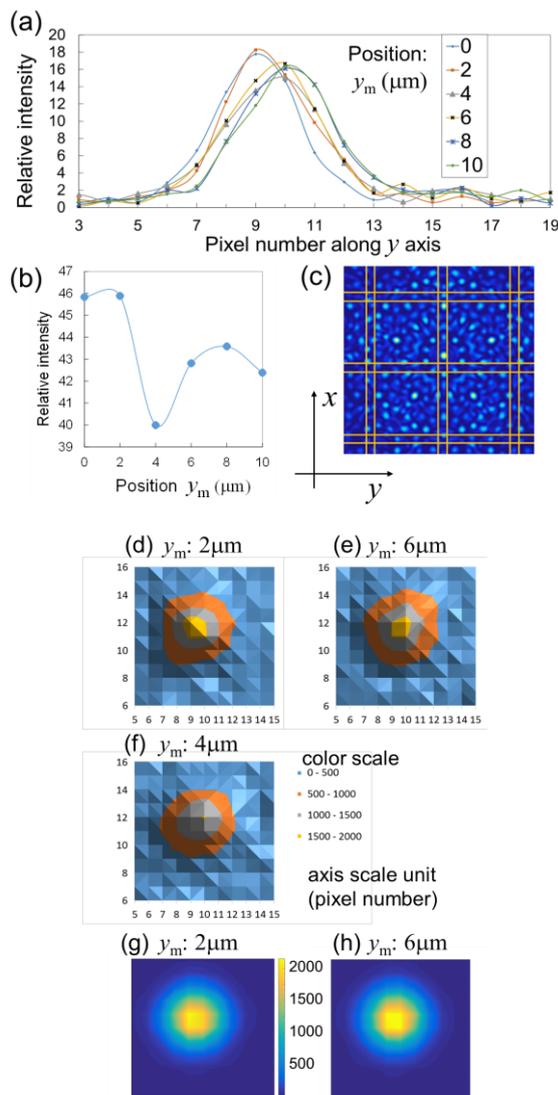


図5 準結晶ホールアレイの位置をy方向にシフトするときの1列の画素の強度変化。(a) y方向に沿った1次元集光点回折パターン、および(b)中心画素が各パターンで最大の強度を持つ3つの連続する画素の強度の合計。(c) 計算された高解像度集光パターンと、CCDの画素の境界(上下・左右それぞれ3列)の配置。 $y_m = 4\mu\text{m}$ に相当する。(d-f) $y_m = 2, 6$ 、および $4\mu\text{m}$ の実験結果。(g, h) (d) および(e)の条件にそれぞれ対応するシミュレーション結果。

4 まとめ

同じ形状の柱の間隔を置いて並べ信号強度を上げる手法や、CCDの画素境界を利用して高い精度で集光スポットの径を調べる手法の開発を行った。これらに加えて、集光点の直後に試料を置くための差動排気システムを開発をした。開発した技術はコヒーレントな集光を行いかつ、その散乱パターンや準結晶の集光径を高精度に計測するのに有効であった。この結果、弱い入射光強度でも散乱光を計測することができ、結果として、高いコヒーレンスで光散乱および集光の実験を行うことができた。

謝辞

ビームラインの使用にあたってご指導いただいたKEKの間瀬一彦先生と菊地貴司様、筑波大学の渡辺紀生先生に感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Suzuki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 053903 (2014).
- [2] M.-A. Henn, H. Gross, F. Scholze, M. Wurm, C. Elster, and M. Bär, Opt. Express **20**, 12771 (2012).
- [3] A.W. Lohmann, H. Knuppertz, J. Jahns, J. Opt. Soc. Am. A **22**(8), 1500 (2005).
- [4] T. Hoshino, N. Watanabe, S. Aoki, K. Sakurai, and M. Itoh, Opt. Express **25**, 26329–26348 (2017).
- [5] T. Hoshino, T. Yatagai, and M. Itoh, Opt. Express **20**, 3954 (2012).
- [6] Y. Tamenori, J. Synchrotron Radiation **17**, 243–249 (2010).
- [7] Y. Suzuki, F. Uchida, Rev. Sci. Instrum. **63**(1), 578 (1992).
- [8] Martinez, A. Klotz, *A practical guide to CCD astronomy* (Cambridge University Press, 1998), Chap. 1, pp. 1–23.

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