

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13725

研究課題名(和文) マルチスライスX線タイコグラフィを駆使したラージスケール・ナノX線CTの実証

研究課題名(英文) Demonstration of large-scale nano X-ray CT by using multislice X-ray ptychography

研究代表者

高橋 幸生 (TAKAHASHI, Yukio)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：00415217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：マルチスライスX線タイコグラフィは投影近似によって制限される空間分解能の問題を解決できるが、再構成像の空間分解能は試料面内方向に比べて、面直方向が100倍以上悪いことが課題となっていた。本研究では、プリセッション測定を組み合わせることで面直方向の空間分解能を向上させることに成功した。また、マルチスライス位相回復計算と逐次近似法を組み合わせた3次元再構成計算法を新たに提案し、試料角度数の少ない条件や制限角度条件において、従来法よりも信頼性の高い3次元試料像の再構成を可能にした。実証実験として、Intel社製CPUを試料として用いた測定を行い、CPU内の銅配線回路の再構成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質や生体の組織・構造および構成元素の分布を広い空間スケールで可視化する技術が希求されている。既に、電子顕微鏡やプローブ顕微鏡技術は成熟し、様々な応用研究が展開されている。しかしながら、これらの先端的観察技術を駆使しても、厚い試料を非破壊で3次元的に高い空間分解能で観察することは難しいのが現状である。マルチスライスX線タイコグラフィが広視野・高分解能3次元ナノ構造可視化法として確立されたことで、今後、様々な実用デバイスの3次元非破壊観察への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Multislice X-ray ptychography can overcome the limitation of the depth of field, reconstructing sectional images perpendicular to the propagation direction without degradation of the spatial resolution and laborious sample preparation. We experimentally demonstrated a multislice x-ray ptychography in combination with precession measurements that can reconstruct multisection images of optically thick objects. In addition, we proposed an improved 3D reconstruction algorithm for X-ray ptychography that is based on 3D iterative reconstruction and multislice phase retrieval calculation. In a synchrotron experiment, ptychographic diffraction data sets of a flat and thick processor specimen were collected under a limited-angle condition, and then high-resolution multislice images of the Cu multilevel interconnects were clearly reconstructed using the proposed algorithm.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：X線イメージング ナノ構造科学 放射光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線タイコグラフィは、干渉性の良いX線を試料に照射し、試料を二次元的に走査して得られる回折パターンに計算機上で位相回復計算を実行することにより、試料電子密度分布像を再構成する顕微法である。最近、諸外国では、X線タイコグラフィと計算機断層撮影(CT: Computed Tomography)を組み合わせた三次元ナノイメージングに関する研究が盛んに行われている。X線タイコグラフィで、高分解能CTを行う場合、投影近似を用いた従来の位相回復法では、観察可能な試料厚さが制限される。この制限を超える手法がマルチスライス法である。マルチスライス法では、厚い試料を薄い層の積み重ねとして、層間のX線波面の伝播を波動光学理論に基づいて計算することで、被写体内部での波面の広がりを考慮する。これとX線タイコグラフィにおける実空間拘束(X線照射領域の重なり)と逆空間拘束(回折強度分布)を付与した反復計算を組み合わせることで、複数層の試料像を再構成する。2014年にマルチスライス法を組み込んだX線タイコグラフィ(マルチスライスX線タイコグラフィ)が実証され、投影近似によって制限される空間分解能の問題を解決できることが明らかにされた。しかしながら、再構成像の空間分解能は試料面内方向に比べて、面直方向(光軸と平行な方向)が100倍から1000倍悪いことが課題となっていた。

2. 研究の目的

高強度部分コヒーレントX線を用いることでマルチスライスX線タイコグラフィの測定スループットを向上させ、更にプリセッション測定を組み合わせることでマルチスライスX線タイコグラフィの三次元空間分解能を格段に向上させる。そして、マルチスライスX線タイコグラフィを半導体デバイス中の三次元配線の観察に応用することが目的である。

3. 研究の方法

試料として二層配線基板、Intel社製CPUを用いた。試料は、X線が十分に透過するように裏面をドライエッチングにより数十 μm 厚さに薄片化した。大型放射光施設SPring-8のBL29XULにおいて、試料のコヒーレントX線回折強度パターン測定を行った。回折データの解析は、大阪大学で管理する専用の計算機を用いて行った。

4. 研究成果

図1に、二層配線基板のコヒーレントX線回折強度パターンおよび再構成結果を示す。この二層配線基板は配線回路が $1.4\mu\text{m}$ のギャップで貼り合わされている。入射X線エネルギー 6.5keV で入射X線角度 -1 度 ~ 1 度の範囲でコヒーレントX線回折強度パターン測定を行い、マルチスライス再構成計算をしたところ、それぞれの層の配線を鮮明に再構成することに成功した。また、再構成像を重ね合わせることで、 30nm 程度の位置ずれが確認された。一方、従来のタイコグラフィ再構成計算で取得した投影像に対してFiltered Back Projection(FBP)を適用し再構築した試料像では、試料厚さ由来の分解能の低下が見られ、本手法が多層配線試料の高分解能観察に有効であることが実証された。

3次元再構成に必要な試料角度数は視野が広がるほど、また空間分解能が高くなるほど増加することが知られており、X線タイコグラフィで実現されている観察視野、空間分解能を活かした3次元観察を現実的な測定時間内で実現することは現状では困難である。マルチスライスX線タイコグラフィで再構成される複数層の投影像には試料光軸方向の情報が含まれており、これを有効活用することで測定角度数を低減することが可能になると考えた。そこで、マルチスライス位相回復計算と逐次近似法を組み合わせた3次元再構成計算法(マルチスライス逐次近似再構成法)を開発した。計算機シミュレーションの結果、試料角度数の少ない条件や制限角度条件において、従来法よりも信頼性の高い3次元試料像の再構成が可能であることが判明した。そして、実証実験として、Intel社製CPUを試料として用いた測定を行った。入射X線

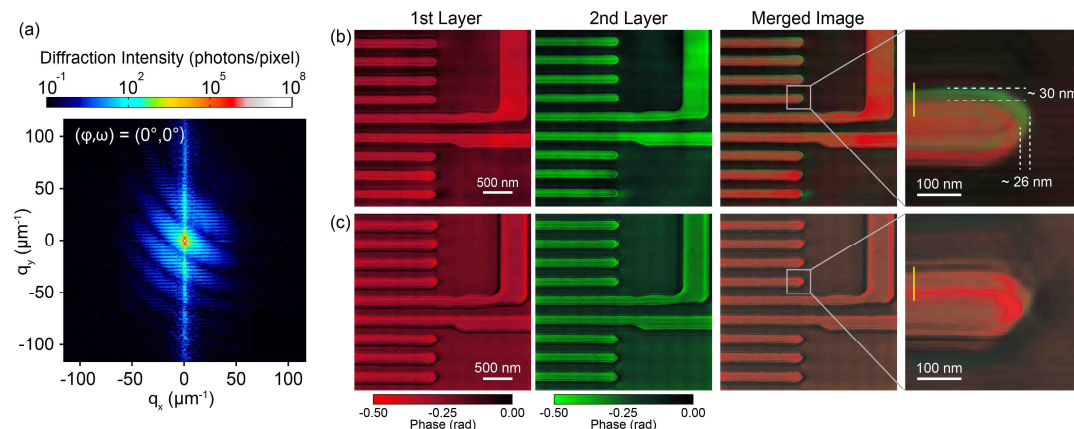


図1 (a)2層配線基板のコヒーレントX線回折強度パターン、(b)マルチスライス法による再構成像、(c)FBPによる再構成像

エネルギー6.5keVで入射X線角度-5度~5度の範囲でタイコグラフィ測定を行い、マルチスライス逐次近似再構成法による3次元再構成計算を行った。図2に厚さ240nmで31層に分割されたCPU内の銅配線回路の再構成位相像の特徴的な層を示す。上層部の幅の広い配線から下層部の幅の狭い配線へと変化していく様子が確認できる。また、光軸(厚さ)方向の構造であるピア構造が21層目に確認することができる。以上のように、マルチスライスX線タイコグラフィが広視野・高分解能三次元ナノ構造可視化法として確立され、電子デバイスの三次元非破壊観察への展開が可能となった。今後、本手法を用いた様々な実用デバイスの三次元非破壊観察への応用が期待される。

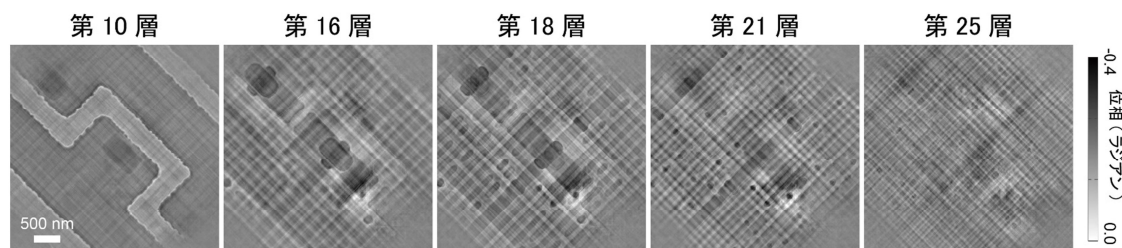


図2 マルチスライスX線タイコグラフィによるCPU内の多層銅配線の観察像

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

1. K. Shimomura, M. Hirose, T. Higashino, Y. Takahashi, Three-dimensional iterative multislice reconstruction for ptychographic X-ray computed tomography, *Optics Express*, 査読有, **26**, 31199-31208 (2018).
DOI: 10.1364/OE.26.031199
2. K. Shimomura, M. Hirose, T. Higashino, Y. Takahashi, Multislice imaging of integrated circuits by X-ray ptychography, *Microscopy and Microanalysis*, 査読有, **24**, 26-27 (2018).
DOI: 10.1017/S1431927618012552
3. K. Shimomura, M. Hirose, Y. Takahashi, Multislice imaging of integrated circuits by precession X-ray ptychography, *Acta Crystallographica Section A*, 査読有, **74**, 66-70 (2018).
DOI: 10.1107/S205327331701525X

[学会発表](計7件)

1. 下村啓, 広瀬真, 東野嵩也, 高橋幸生, マルチスライス逐次近似再構成法を利用した高分解能三次元 X 線タイコグラフィ, 第 32 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 福岡国際会議場, 2019 年 1 月 11 日
2. K. Shimomura, M. Hirose, T. Higashino, Y. Takahashi, Multislice Imaging of Integrated Circuits by X-ray Ptychography, The 14th International Conference on X-ray Microscopy (XRM2018), Saskatoon, Saskatchewan, Canada, August 19-24, 2018
3. K. Shimomura, M. Hirose, T. Higashino, Y. Takahashi, Multislice observation of integrated circuits by X-ray ptychography, Coherence 2018: International Workshop on Phase Retrieval and Coherent Scattering, Port Jefferson, USA, June 24-28, 2018
4. 下村啓, 広瀬真, 東野嵩也, 高橋幸生, マルチスライス X 線タイコグラフィによる厚い試料の高分解能観察, 第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, つくば国際会議場, 2018 年 1 月 9 日
5. 下村啓, 広瀬真, 高橋幸生, マルチスライス X 線タイコグラフィによる多層配線回路の観察, 精密工学会秋季大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017 年 9 月 20 日
6. K. Shimomura, M. Hirose, N. Burdet, Y. Takahashi, Multislice x-ray ptychography towards 3D high-resolution imaging, SPIE2017, San Diego Convention Center, San Diego, California, USA, August 7, 2017

7. 下村啓, 広瀬真, Nicolas Burdet, 高橋幸生, ランダムアレイを利用したマルチスライスX線タイコグラフィの高分解能化, 第30回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 神戸芸術センター, 2017年1月9日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/takahashi-y/html/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 下村 啓

ローマ字氏名: (SHIMOMURA, kei)

研究協力者氏名: 広瀬 真

ローマ字氏名: (HIROSE, makoto)

研究協力者氏名: 東野 嵩也

ローマ字氏名: (HIGASHINO, takaya)