

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13408

研究課題名(和文)埋め込みX線ターゲットを用いた超解像X線撮像法の実証

研究課題名(英文)Development of Super-resolution Technique in Transmission X-ray Imaging using Embedded X-ray Targets

研究代表者

志村 考功(Shimura, Takayoshi)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：90252600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々は多数の小さなX線光源を用いることによって空間分解能とX線強度の両立を可能とする超解像透過型X線撮像法を提案した。この手法では光源の位置情報を用いることにより画像回復計算を行い、単一の光源を用いたときと同等の空間分解能の像を得るものである。埋め込みX線ターゲットを用いることによりマルチドット状のX線光源を実現し、この手法の有効性を検証した。その結果、6個の直径1μmの光源が配列したターゲットを用いたときに、0.6μmのライン&スペースのX線用チャートを明瞭に解像できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We propose super-resolution technique in transmission X-ray imaging, in which an array of small X-ray sources is utilized. In this technique, high-spatial-resolution X-ray image equivalent to that obtained with a single small X-ray source is reconstructed from the observation using the source array. We demonstrate the principle of this technique using multi-dot gold targets embedded in a silicon substrate in an X-ray imaging system. In X-ray imaging with an array of six X-ray sources of 1 μm diameter, a line & space pattern of 0.6 μm width is clearly resolved, indicating the effectiveness of this technique.

研究分野：応用表面科学

キーワード：X線 イメージング 超解像 画像回復計算

1. 研究開始当初の背景

透過型 X 線撮像装置は物質の内部を非破壊で観察できることから基礎研究から産業利用まで様々な分野で活用されている。

マイクロフォーカス X 線源を用いた X 線撮像装置では、電子銃からの電子線を電磁レンズでターゲット金属上に集光照射し X 線を発生させる。焦点の下流に試料を配置し、透過した X 線を 2 次元検出器で測定することにより試料の拡大 X 線像を得ることができる。

このとき像の空間分解能は光源サイズと 2 次元検出器の分解能で決まる。被写体が検出器に密着する場合は検出器の分解能によるが、被写体が光源側に近づくにつれ光源サイズにより分解能が決定される。硬 X 線領域の 2 次元検出器の分解能 (数十 μm) と感度はトレードオフの関係にあり、強度の弱い実験室系 X 線源を用いる場合は検出器の分解能を犠牲にする必要があり、高分解能化のためには微小光源が必須となる。しかしながら、電子線の集光サイズを小さくし光源サイズを小さくすると比例して投入電力も小さくしなければならず、空間分解能と X 線強度のトレードオフは X 線撮像装置の本質的課題として甘受されてきた。

2. 研究の目的

我々は、埋め込み X 線光源をタルボ・ロー干渉計に適用することにより非常に小型で高効率な X 線位相撮像光学系を実現できることを示した (T. Shimura et al., Opt. Lett 38, 157 (2013).)。埋め込みターゲットは軽元素基板中にターゲット金属を埋め込んだ構造をしており、電子線照射領域がターゲット金属より大きくても、実効 X 線光源サイズが埋め込みターゲットの大きさで決まる。本課題ではこの埋め込み X 線光源技術を適用することにより、高空間分解能と高 X 線強度を両立する実験室系の透過型 X 線撮像法の実証を行う。

3. 研究の方法

本課題では、埋め込み X 線光源を用いることにより、高空間分解能イメージングを実用的な測定時間で実現する実験室系の透過型 X 線撮像法の実証を目的とする。既存設備と作製経験を考慮し、初年度は数 10 μm 領域の空間分解能の実証例の取得から始め、次年度後半で数 100 nm の空間分解能の実証を目指す。

(1) 埋め込みターゲットの光源形状の任意性を利用した超解像技術

埋め込みターゲットは軽元素基板中にターゲット金属を埋め込んだ構造をしており、電子線照射領域がターゲット金属より大きくても、実効 X 線光源サイズが埋め込みターゲットの大きさで決まるため、光源形状を任意に設定できる。ターゲット金属をマルチドット

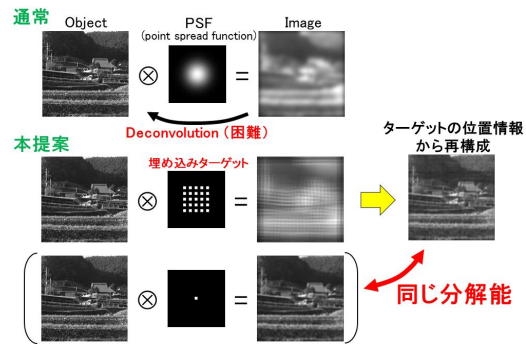


図 1 埋め込み X 線源を用いた超解像技術

ト状に埋め込めば、マルチドット状の実効光源を実現できる。さらに、電子線の材料への侵入長はたかだか数 μm 程度であり、埋め込み金属ターゲットの厚さは 1 μm 程度で十分なため、容易にサブミクロンの埋め込みターゲットを作製できる。スリットを用いて仮想光源を形成する場合は、透過力の高い X 線を遮蔽する必要があるため、スリット基材の厚さが数十 μm 以上必要であり、1 μm 以下の光源サイズは困難である。

また、埋め込みターゲットの基板材料としてダイヤモンドを用いれば、その熱伝導率は 1000-2000 W/mK と銅と比べても 2 - 5 倍も高く、その放熱特性が格段に向上する。

このマルチドット光源の活用による超解像技術の概要を図 1 に示す。一般に画像計測により得られる像は被写体からの実像に測定系に依存する関数 (PSF) を畳み込み積分 (Convolution) した像として得られる。通常の超解像技術は、PSF を何らかの方法により推定し、ボケのない元画像を得ようとするものである。しかし、通常は、PSF が正確に得られないことや観察画像にノイズが含まれることから元画像の再構築は困難なものとなっている。本技術では、微細な金属ターゲットを多数配置した埋め込みターゲットを用いる。この場合、金属ターゲットの位置は正確に求められるので、その位置と強度情報から再構築すると、元画像は得られないものの、再構築された像は微細な金属ターゲット 1 個で撮影した像と同じ解像度を有することになる。金属ターゲットにばらつきがあっても平均的な像が得られる。図 1 の場合、5 \times 5 個の金属ターゲットに電子線を照射することになるが、再構築された像は電子線照射領域の 1/10 の大きさの光源で得られる像と同等の解像度となる。この手法により高分解能と測定時間の短縮を同時に達成することが可能となる。

(2) 数 10 μm 径の埋め込みターゲットの作製

申請者等はマルチドット状の埋め込みターゲットを作製し、自己像直接検出型 2 次元タルボ・ロー干渉計の開発に取り組んできた。その光学系と作製したマルチドット状の埋め込みターゲット、干渉計で得られた自己像を図 2 に示す。得られた自己像の visibility は 38% と非常に高い値を示し、これは直径 1.8

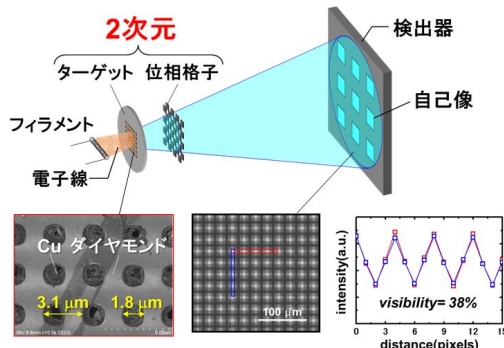


図2 自己像直接検出型2次元タルボ・ロー干渉計と埋め込みターゲット及び自己像

μm の埋め込みターゲットが実効X線光源として機能していることを表している。埋め込みターゲットは学内の施設において自作しており、その作製プロセスを図3に示す。市販のダイヤモンド基板にフォトリソグラフィと反応性イオンエッチングにより細孔を形成し、そこにターゲット金属を埋め込んでいる。ターゲット金属としてはCu、Mo、W、Auを埋め込んだ実績があり、所望のX線のエネルギーにより選択する。現時点で埋め込みターゲットとしては、 $1.8\ \mu\text{m}$ 径の光源を作製可

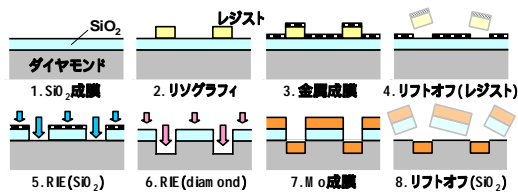


図3 埋め込みターゲットの作製プロセス

能だが、申請者等は $10\ \mu\text{m}$ 以下に電子線を集光できる電子銃を所有していないため、本研究では既存の $100\ \mu\text{m}$ 径集光の電子銃用に、まず数 $10\ \mu\text{m}$ 径の埋め込みターゲットの作製を行い、本手法の原理検証実験を進める。

(3) 数 $10\ \mu\text{m}$ 径ターゲットと現有する電子銃による画像取得と像再構成処理技術の開発
作製した数 $10\ \mu\text{m}$ 径の埋め込みターゲットを用いて画像取得を行い、再構成処理法の構築を行う。再構成処理はCAI (coded aperture imaging)法をベースに開発を行う。CAI法はピンホールカメラのピンホールを複数にして得た像から元画像を再構成する手法であり、基本的には同様の画像プロセスになる。

(4) 数 $100\ \text{nm}$ の空間分解能を目指す約 $1\ \mu\text{m}$

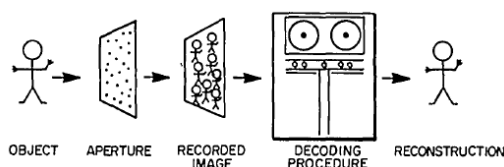


図4 CAI法の概念図(E. F. Fenimore & T. M. Cannon, Appl. Opt. 17, 337 (1978).)

径埋め込みX線ターゲットを作製する。

(5) 約 $1\ \mu\text{m}$ 径埋め込みX線ターゲットによる本撮像法を実証し、高空間分解能と高X線強度の両立を目指す。

4. 研究成果

まず、ターゲットの微細化により像の分解能が向上することを確認するため、直径 $200\ \mu\text{m}$ の電子線照射領域に対し、 $500\ \mu\text{m}$ から $50\ \mu\text{m}$ 角の埋め込みターゲットを配置し、撮像実験を行った。電子線より大きい $500\ \mu\text{m}$ 角の埋め込みターゲットでは、電子線照射領域がそのままX線の焦点サイズとなる。試料には、 $100\ \mu\text{m}$ ピッチのTEM用のグリッドを用い、カウント数が同程度になるように露出時間を変えて撮影を行った。図5に示す通りターゲットのサイズが小さくなるにつれてメッシュが鮮明になっており、点線部の強度プロファイルを見ても、より矩形状になっていることがわかる。このように埋め込みターゲ

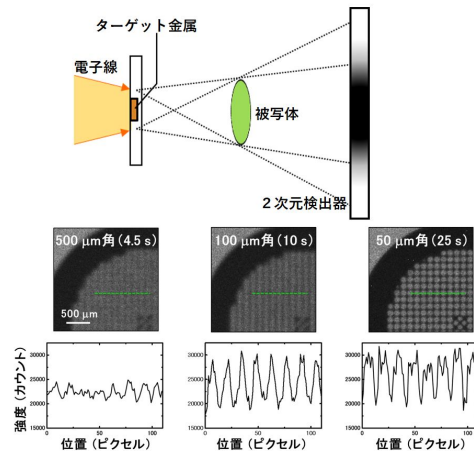


図5 埋め込みターゲットの微細化と分解能評価

ットの縮小により分解能が向上することを確認することができた。一方、埋め込みターゲットの大きさが小さくなるにつれ、X線強度が減少し、露出時間が4.5秒、10秒、25秒と長くなっていることもわかる。

さらに微細な埋め込みターゲットについても検証した。図6に示すように線幅 $1.5\ \mu\text{m}$ 、長さ1ミリの微細ライン状埋め込みターゲットを作製し、ライン状光源に垂直方向の分解能を評価した。約8倍の拡大投影で $8\ \mu\text{m}$ ピッチの格子の透過像を取得したところ、鮮明な透過像を測定することができた。埋め込みターゲットを用いて実効光源サイズを縮小することで電子線照射領域の $1/20$ 以下のL&Sを解像できることがわかった。

次に2個の埋め込みターゲットを用いて検証を行った(図7)。直径 $200\ \mu\text{m}$ の電子線照射領域内に、 $25\ \mu\text{m}$ 角の埋め込み金属を2個、配置したターゲットを用いた。2種類のテストパターンの像の復元を試みた。CCDのノイズのため復元像中にも縦方向ノイズが

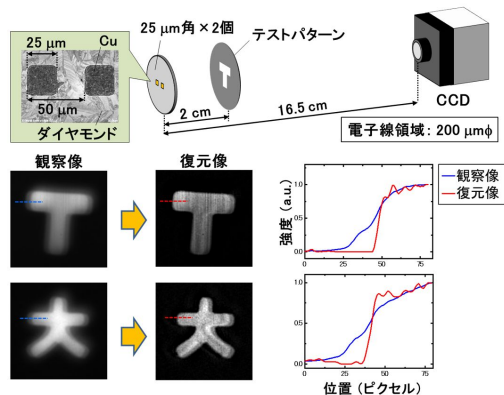


図7 2個の埋め込みターゲットによる撮像と像回復

目立つが、パターンのオーバーラップが除去されており、鮮明な画像を得ることができた。エッジ部のプロファイルを見ると、観察像に比べて復元像は強度変化が急峻で、像の分解能が改善していることがわかった。

次に更なる高分解能化を目指して、直径 1 μm の埋め込みターゲットを作製した。Si 基板上に深さ 3-4 μm の穴加工を施し、めっきにより金を埋め込んだ。その一例を図8に示す。シングルに加え、クロス状、六角形や五角形状等の作製を行った。

元画像を $f(x,y)$ 、PSF を $g(x,y)$ 、観察像を $h(x,y)$ とすると、 $h(x,y) = f(x,y) \otimes g(x,y)$ の関係が成り立つ。両辺のフーリエ変換をとると、 $H(u,v) = F(u,v) \times G(u,v)$ (大文字で関数のフーリエ変換を示す) となり、周波数空間では $H(u,v)$ は $F(u,v)$ と $G(u,v)$ の積として表される。つまり、 $G(u,v)$ の周波数特性が観察像に含まれる情報を決定する。図9に2種類のマルチ光源の $|G(u,v)|$ を比較した結果を示す。3個の光源

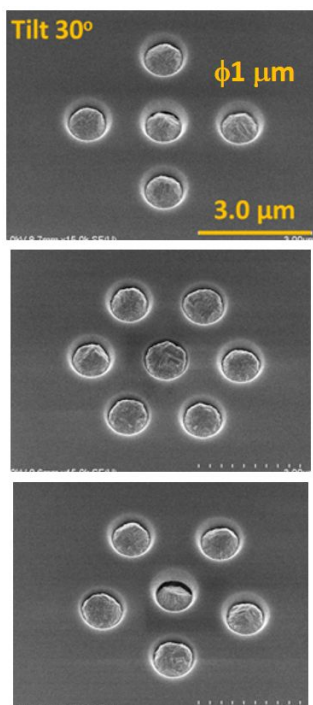


図8 Si 基板上的の金埋め込みターゲット

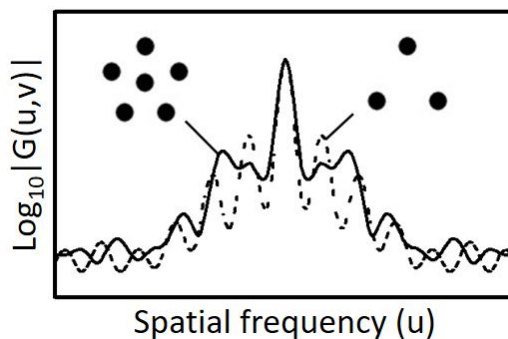


図9 2つの光源配置のフーリエ変換

ではその高い周期性のため、周波数空間で一定の間隔で極小点があり、ある周期の情報も著しく欠落することを示している。一方6個のマルチ光源では周期性が低いため $|G(u,v)|$ の変動が小さいことがわかる。これはマルチ光源を非周期的な形状に配置する必要があ

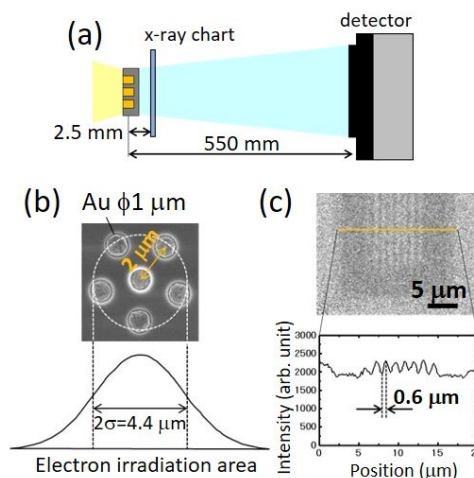


図10 マルチドット埋め込み光源を用いた高分解能イメージング

ることを示している。

直径 1 μm の埋め込み X 線ターゲットを中心からの距離が 2 μm になるように正五角形状に配置したターゲットの例を図 10(b)に示す。このターゲットに標準偏差で 2.2 μm 程度の広がりを持つ電子線を照射して実験を行った。光源から 2.5 μm の位置に分解能評価用の X 線チャートを配置し、約 220 倍に拡大された像をピクセルサイズ 24 μm の CCD 検出器で測定した(図 10(a))。ライン幅 0.6 μm の X 線チャートを解像した結果を図 10(c)に示す。チャートのライン&スペースのパターンを確認することができ、また、その強度分布において 0.6 μm の X 線チャートが解像できていることがわかる。

以上の結果は、マルチドット埋め込み X 線ターゲットを用いた超解像技術により空間分解能の向上と X 線強度の両立が可能であることを示している。

5. 主な発表論文等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

志村考功 (SHIMURA TAKAYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90252600

(2) 連携研究者

渡部平司 (WATANABE HEIJI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90379115

(3) 連携研究者

細井卓治 (HOSOI TAKUJI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90452446