

令和元年6月13日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04375

研究課題名(和文) サブナノオーダー欠陥評価のための物性分析光相関顕微鏡の開発

研究課題名(英文) Ghost imaging for detecting sub-nano defect

研究代表者

水谷 康弘 (Mizutani, Yasuhiro)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：40374152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：半導体検査工程においてサブナノオーダーの欠陥を光学的に検出する手法が求められている。一般的に、光学的な応答強度と対象物の大きさは相関があるため、欠陥が小さくなるほど強度が弱くなり検出が困難になる。そこで、本研究では、光学的に非常に弱い応答をする欠陥からの散乱光をイメージングするために、光相関イメージングを適用することを試みた。ここでは、フォトンカウンティングと組み合わせることで数フォトンレベルでのイメージングを可能にした方法と、ディープラーニングと組み合わせることにより検出速度を高速化させた手法とを提案し実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブナノオーダーの欠陥検出で必要となる微弱な光のイメージングを可能にする手法を提案した。ここでは、点型の光検出器でイメージングできるゴーストイメージングの感度および検出速度を向上させた。具体的には、フォトンカウンティング技術を用いてフォトンが到達する時間を利用したイメージング法を確立し数100フォトン以下でもイメージングが可能になるようにした。また、ディープラーニングを組み込むことで、5回という極めて少ない計測回数で測定を可能にした。

研究成果の概要(英文)： We describe a method for detecting a sub-nano defect by using the ghost imaging. In this study, we have developed two types system, such as high-sensitive imaging using arrival photon time and high-speed imaging with deep learning. By calculate spatial dispersion of correlation efficiency between illumination patterns and an arrival time of the photons, we have obtained fluorescence images using several hundred photons.

An improvement of imaging time for the ghost imaging is realized by using deep learning. We have applied a deep learning technique for reducing numbers of measurement. In the matter of a deep learning, the proposed method deals with a convolutional neural network. As a result, we have developed 60 times faster than the conventional GI. Additionally, we have observed a moving micro-particle with 0.08 sec.

研究分野：光応用工学

キーワード：シングルピクセルイメージング ゴーストイメージング フォトンカウンティング ディープラーニング 微弱光イメージング 欠陥検出

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

1. 研究開始当初の背景

近年,ナノテクノロジーの進展に伴い,半導体リソグラフィにおける微細加工,超高性能望遠鏡などに用いられるミラーの高精度研磨面およびグラフェンなどの新規物質を用いた高精度分子設計技術を応用した高性能デバイスの開発が進められている.これらのデバイスは試作レベルでは成功しているものの量産化技術が確立されていない.これは,部分的に発生するサブナノオーダーの微細な欠陥や汚染分子がデバイス上に存在することによる不良が原因となりスループットが向上しないためである.すなわち,大きさが10nm以下になると光学応答が極端に弱くなるため散乱光の検出や汚染分子の光吸収分析には従来よりも高感度な手法が必要となる.簡便な不良位置イメージング技術が確立されれば,図1に示すように,高品位な加工やデバイスを安定的かつ大量に市場に供給することが可能になる.



Fig. 1. 本研究の背景と意義.

このような社会的背景に対して,近年,光強度相関を用いた高感度なイメージング法が報告されている[T.B. Pittman, et. al., Phys. Rev. A 52, R3429 (1995)].これは,従来のイメージング法とは異なり,空間的にランダムな強度分布の光を照明光に用い,被撮影物体からの散乱光を点型の検出器を用いて強度を取得し,照明光との相関計算により撮影する手法である.相関を用いた手法であることや点型の検出器が高感度であることから,一般的なイメージング法よりも高感度な手法であり,したがって,微細な欠陥からの微弱な散乱光を検出する手法として有力である.しかしながら,高感度特性が定量化されていないことや,測定に時間を要することから,これまでに産業への応用には至っていない.

このような社会的背景に対して,近年,光強度相関を用いた高感度なイメージング法が報告されている[T.B. Pittman, et. al., Phys. Rev. A 52, R3429 (1995)].これは,従来のイメージング法とは異なり,空間的にランダムな強度分布の光を照明光に用い,被撮影物体からの散乱光を点型の検出器を用いて強度を取得し,照明光との相関計算により撮影する手法である.相関を用いた手法であることや点型の検出器が高感度であることから,一般的なイメージング法よりも高感度な手法であり,したがって,微細な欠陥からの微弱な散乱光を検出する手法として有力である.しかしながら,高感度特性が定量化されていないことや,測定に時間を要することから,これまでに産業への応用には至っていない.

2. 研究の目的

本研究の目的は,サブナノオーダーの欠陥を光学的に検出する物性分析光相関顕微鏡を構築することである.サブナノオーダーの欠陥からの散乱光は微弱であるため,高感度な検出法である光相関イメージング法をベースとして,フォトンカウンティング手法を用いてフォトンレベルでのイメージングを行う.また,測定の高速化を実現するために,ディープラーニングを組み合わせる.

3. 研究の方法

光相関イメージングは,ゴーストイメージングとも呼ばれており,図2に示すとおり簡便な光学配置でイメージングできる手法である.ランダムな空間分布を有する照明光を被

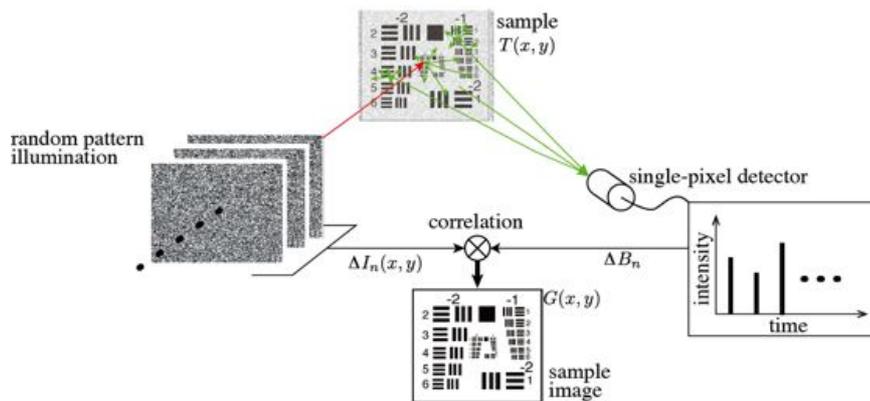


Fig. 2. 光相関イメージング (ゴーストイメージング) の原理.

撮影物体に照明し,被撮影物体の光学応答強度を光検出器で測定する.検出した光強度は,照明した光強度分布との相関を計算することにより,被撮影物体を相関係数の分布としてイメージングする.相関計測であることから耐ノイズ性に優れているため微弱光のイメージングが可能であることや,反射,散乱,蛍光など様々な光学系に適用できる利点がある.しかしながら,高感度特性が定量化されておらず,また,相関演算を行うため大量の測定データが必用とされる欠点があった.

高感度特性を定量化するために,本研究ではフォトンカウンティング技術を適用する.ここでは,図3に示すとおり,光強度のかわりにフォトンを検出するまでの時間を用いてイメージングする.まず,基準信号を受け取ると照明系からランダムなパターンが照明される.このとき,応答光強度が弱いと離散的にフォトンが被撮影物体から検出器に到達する.照明開始から最初にフォトンが到達するまでの時間は,統計的に考えると光強度に依存する.したがって,

到達するまでの時間と照明パターンとの相関を演算することで被撮影物体のイメージングが可能となる。

高速化に関しては、ディープラーニング手法を用いる。相関演算をもちいるため十分でない測定回数だと得られる画像はノイズが多くなる。ところが、このノイズの成分には、被撮影物体の情報がわずかながら含まれている。そこで、図4に示すとおり、不十分な相関演算で得られた画像を、あらかじめ学習させておいたCNN(Convolutional Neural Network)を用いて画像を推定する。

4. 研究成果

(1)ファーストフォトンゴーストイメージング

図5に、フォトンが到達する時間を用いたゴーストイメージング(ファーストフォトンゴーストイメージング)の光学系を示す。ランダムなパターンを照明するためにDMDプロジェクタを用いた。DMDプロジェクタからの光は、対物レンズを有する顕微鏡

光学系により50倍に縮小され被撮影物体に投射される。被撮影物体から発せられたフォトンは、光電子増倍管により検出され照明したパターンと相関演算をおこなった。

図6に、被撮影物体に直径10umのガラスマイクロ球をもちいた撮影結果を示す。一般的な顕微鏡光学系では、ガラスマイクロ球は屈折率差が少ないためあまり鮮明な画像は得られない。そのため、ゴーストイメージングの有効性を示すのに都合の良いサンプルである。図6(a)は、従来のゴーストイメージングと比較した結果である。光強度を弱くすると従来のゴーストイメージングでは鮮明な画像が得られないが、提案手法ではガラスマイクロ球をイメージングできていることがわかる。また、図6(b)に示すとおり、検出するフォトン数を数10個レベルまで少なくしてもイメージングできていることがわかり、提案手法の微弱光有効性を示した。

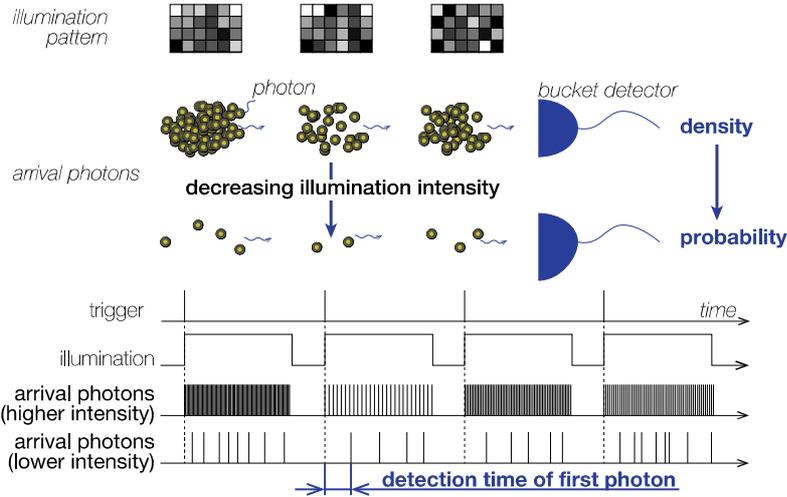


Fig. 3. ファーストフォトンゴーストイメージングの測定原理。

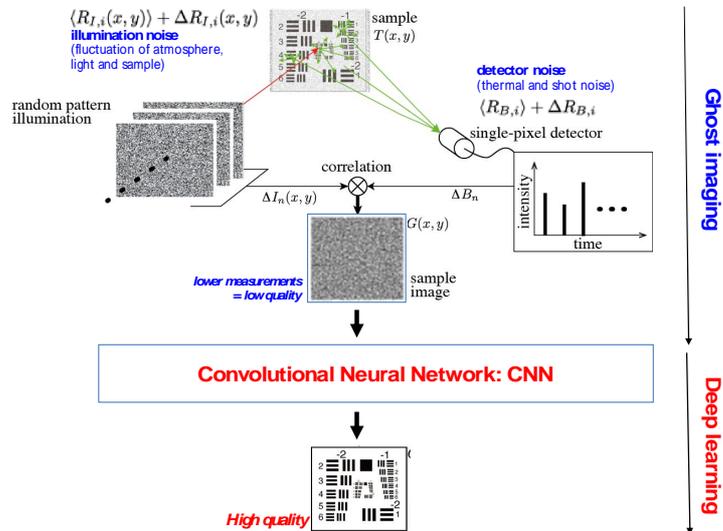


Fig. 4. ディープラーニングを用いたゴーストイメージング。

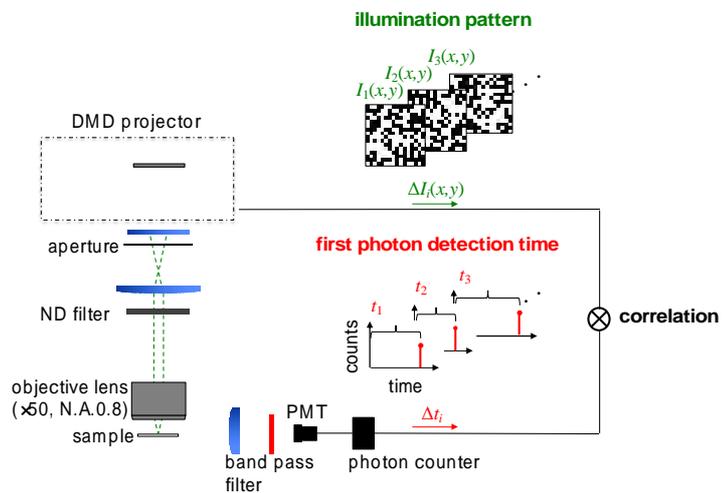


Fig. 5. ファーストフォトンゴーストイメージングの光学系。

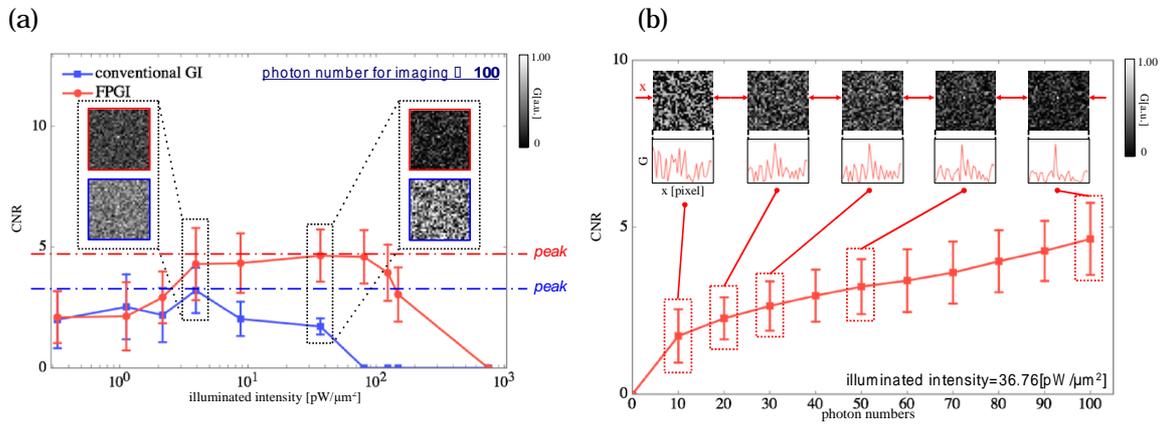


Fig. 6. ファーストフォトンゴーストイメージングによるガラスマイクロ球の測定結果。(a) 従来のゴーストイメージングとの比較, (b) より少ないフォトン数での画像検出結果。

(2) ディープラーニングにより高速化されたゴーストイメージング

図7に, 高速化のためにもちいたCNNを示す. 本研究では, 一般的な画像認識にもちいるCNNを利用した. このCNNは, 3層で構成されている. また, 最終的に得られる結果は, 画素ごとに光強度のある確率が得られる. すなわち, 最終的な結果を並べることでイメージングが可能になる.

図8に, ガラスマイクロ球をイメージングした結果を示す. ここでは, 画素ごとに200回学習させて係数を最適化したCNNをもちいた. また, 比較のために, 従来のゴーストイメージングも行った. 図8に示すとおり, 5回の結果では, 従来のゴーストイメージングでは画像を取得できていないことがわかる.ところが, 200回学習したCNNを用いることにより5回の測定

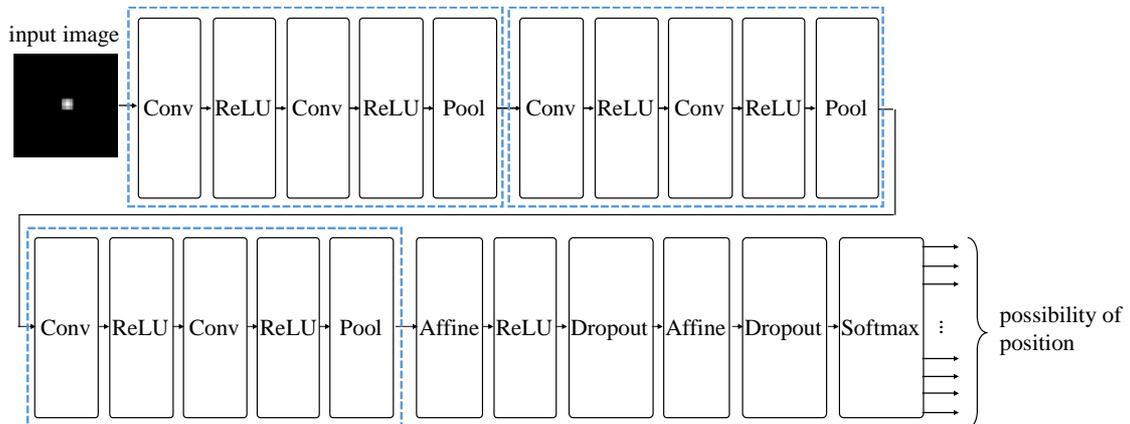


Fig. 7. ゴーストイメージングを拘束するために用いたディープラーニング。

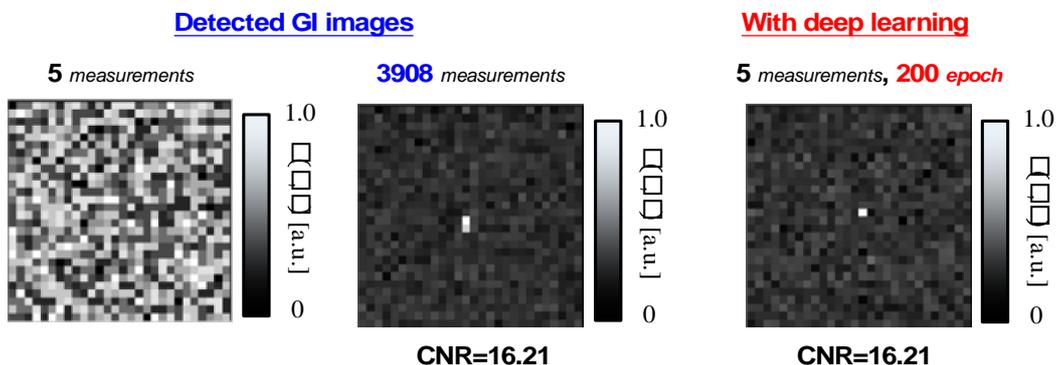


Fig. 8. ディープラーニングを用いたゴーストイメージングによるガラスマイクロ球の測定結果。

でもイメージングができていることがわかる。これは、従来のゴーストイメージングでは 3908 回の測定をしたときの画質と同じであることから 約 800 倍の高速化を実現することができた。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 15 件)

【招待講演】 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, High-speed ghost imaging with deep learning, ICPE, 2019.

Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, First photon ghost imaging by single photon counting, ISOT 2018, 2018.

八木, 水谷康弘, 高谷裕浩, 日本機械学会年次大会, 全反射照明を用いた多波長光相関イメージングによる 3 次元形状計測に関する研究(第一報) 基本 原理の検証, 2018.

八木, 水谷康弘, 高谷裕浩, 精密工学会秋季大会, 全反射照明による多波長光相関イメージングを用いたサブマイクロスケール三次元形状計測に関する研究 (第 1 報) 基本原理の検証, 2018.

田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩, 微弱励起光による光相関を用いた蛍光イメージングに関する研究 (第 3 報) 検出器の時間分解能が画像コントラストに及ぼす影響, 2018 年度精密工学会春季大会, 2018.

【招待講演】 水谷康弘, 高谷裕浩, ゴーストイメージングとその応用 -単一光子到達時間検出によるゴーストイメージング-, Optics & Photonics Japan 2017 (OPJ2017), 2017.

【招待講演】 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, Ghost imaging for single photon counting, The Secenth Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP), 2017.

Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, Two dimensional ellipsometer by ghost imaging technique, The 13th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2017), 2017.

八木音樹, 水谷康弘, 高谷裕浩, 全反射照明を用いた多波長光相関による 3 次元形状計測に関する研究, 2017 年度関西地方学術講演会, 2017.

田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩, 微弱励起光による光相関を用いた蛍光イメージングに関する研究(第 2 報) -単一光子検出における高感度イメージング法の検討-, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2017.

田口寛樹, 水谷康弘, 高谷裕浩, 微弱励起光による光相関を用いた蛍光イメージングに関する研究(第 1 報) -光相関イメージングにおける効率的な照明法の検討-, 精密工学会 2016 年度秋季大会, 2016.

Hiroki Taguchi, Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya, First Photon Detection Ghost Imaging, OSA Imaging and Applied Optics Congress, 2017.

【招待講演】 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, Ghost imaging ellipsometry, Interna onal Symposium on Optomechatronic Technology 2016, 2016.

【招待講演】 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, Illumination Pattern Analysis for Fluorescent Ghost Imaging, International Symposium on Optical Memory 2016, 2016.

【招待講演】 Yasuhiro Mizutani, Yasuhiro Takaya 他, Single-pixel imaging by Hadamard transform and ghost imaging and its application for hyperspectral imaging, Proc. of SPIE Vol. 10021, 2016.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：高谷 裕浩

ローマ字氏名：(TAKAYA, Yasuhiro)

研究機関名：大阪大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁): 70243178

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。