

令和 5 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02036

研究課題名(和文) 動的位相同期制御による局在光場を用いた次世代微細機能構造のナノ欠陥超解像計測

研究課題名(英文) Nano-defect super-resolution measurement of next-generation micro-functional structures using localized optical fields with dynamic phase control

研究代表者

高橋 哲 (Takahashi, Satoru)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：30283724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：従来、实用性の高い超解像法として開発されてきた構造照明蛍光顕微法(SIM)に着目し、位相同期を行った参照光波と融合することで、コヒーレント結像下においても超解像観察機能を発現可能な次世代微細機能構造の超解像欠陥計測技術の確立を目指した。結果、振幅一定で位相のみが周期的に変動する次世代光学デバイスの微細欠陥検出が可能な手法を実現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果により、VRゴーグル内の光学系に代表される、微細位相変調を活用する次世代光学デバイスの直接検査・評価が可能になる。これにより、スマホに匹敵するとされる、新しい技術デバイスの社会実装に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：We focused on structural illumination microscopy (SIM), which has been developed as a highly practical super-resolution method, and aimed to establish a super-resolution defect measurement technique for next-generation microfunctional structures that enables super-resolution observation even under coherent imaging by combining it with phase-locked reference light waves. As a result, we have succeeded in developing a method for detecting microdefects in next-generation optical devices in which the amplitude is constant and only the phase fluctuates periodically.

研究分野：光応用計測

キーワード：超解像 ナノ計測 微細機能構造

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

100nm 以下の微細構造製造技術は、量子的性質の発現やマクロスケールでは実現できない光学的（例えば直角行路を有する微細光回路）、力学的機能（例えば、超撥水性）等の特異な物理制御が可能であることから、次世代高機能デバイス実現の上で重要な要素技術の一つであり、製造デバイスの高付加価値化を目指している日本の製造業にとって最重要課題の一つといえる。それらを実現する加工技術は従来半導体加工技術の高度化の他、EUV 光源の適用や、ナノインプリント加工技術、EB・FIB 加工技術、自己組織化ボトムアップ製法など様々な加工原理が提案され、活発に研究・開発が進められている。

一方、これらの加工された微細機能構造の評価技術としては、従来より、高速性、非破壊性等といった現場適用性の高さから有効に使われてきた遠隔場光学的手法の適用は、波長に基づく回折限界のため困難となる。結果として、SEM, STEM, TEM 等の電子線利用型計測法や AFM, STM, NSOM 等に代表される走査型プロービング手法が適用されることが多いが、それらは、真空環境の必要性や近接プローブ走査に起因するスループット低下、サンプル非侵襲性の悪化といった問題が潜在し、製造プロセスの評価技術としては限定した適用に限られていた。そのため、次世代微細機能構造を高い信頼性をもって創製するためには、従来遠隔場光学的手法が有していたような現場適用性の高さをもちつつ、サブ 100nm 解像力を有する新しい構造欠陥計測評価手法の確立が不可欠となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究の具体的な目的は、超解像光計測法の中でも高速計測を実現する面内並列一括計測特性の観点で、本質的に、高い製造現場適用潜在性を有する構造照明超解像法 (SIM: Structured Illumination Microscopy) に着目し、従来不可能だった (蛍光修飾等を施さない) コヒーレント結像下においても光学的回折限界を超越した超解像を実現し、50 nm 以下の微細欠陥 (光学的に振幅変調はなく位相変調のみを発現する位相欠陥を含む) の解像力を有する次世代微細機能構造ナノ計測技術の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

図 1 に従来の構造照明超解像法 (従来 SIM) と本研究で提案する拡張型構造照明超解像法 (提案コヒーレント SIM) の概念図を示す。前者においては、構造照明による物体表面からの応答を蛍光等で取得する形態となっており、強度情報に関する超解像法ということができる。一方で後者は、構造照明による物体表面からの応答として、より直接的な散乱光自身を扱う。そして、強度のみならず、位相も含めた (全ての光学情報に相当する) 複素振幅情報の超解像を行う。そのため、検出パラメータとしては (従来のように観察面光学応答に対して強度情報のみならず) 位相情報も含めた複素振幅情報の取得が必要となり、ここでは参照光と干渉させ、位相シフト法を適用することで、これを実現する系となっている。

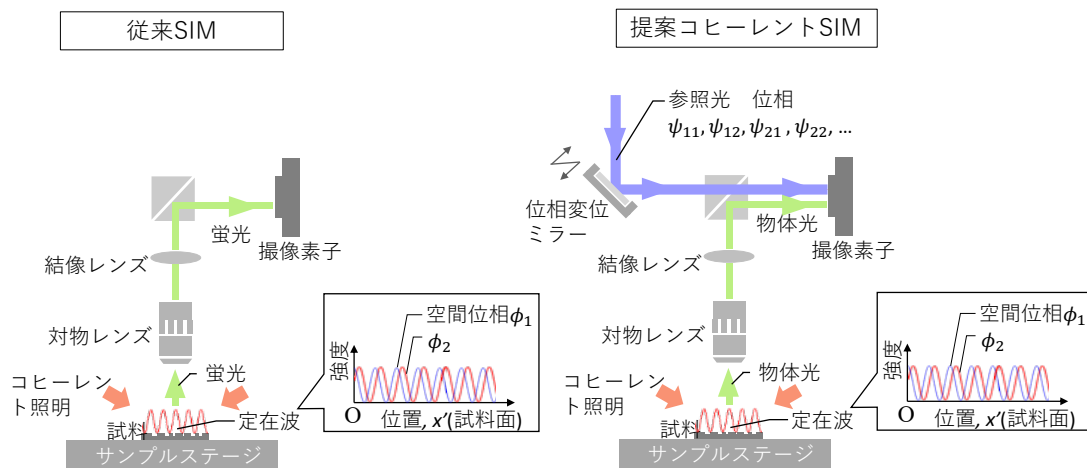


図 1. 強度情報を扱う構造照明超解像法 (従来 SIM) と複素振幅情報を扱う提案コヒーレント SIM

#### 4. 研究成果

前章で記した、複素振幅情報を取得し、複素振幅情報として画像再構成を実現するアルゴリズムを新たに構築し、コヒーレントSIMの開発に成功した。以下に、開発コヒーレントSIMの有効性の実証例を示す。まず、最も基本的な複素振幅超解像性を確認するために、500nm 間隔で隣接した二点の複素振幅変調散乱体（図2）に開発手法を適用し、両者の解像を試みた（この際の各種設定条件を表1に整理した）。コヒーレント結像系遮断周波数に基づけば、一般的に期待できる分解能( $\lambda/NA$ )は2025nmとなるため、一般的な顕微法（ここでは位相振幅観察が可能なデジタルホログラフィ顕微鏡：DHM）においては、500nm 間隔の二点は解像が不可能である。一方で提案開発法においては、相対的位相情報含めて両散乱体の複素振幅情報が、解像されていることが分かる（図3）。

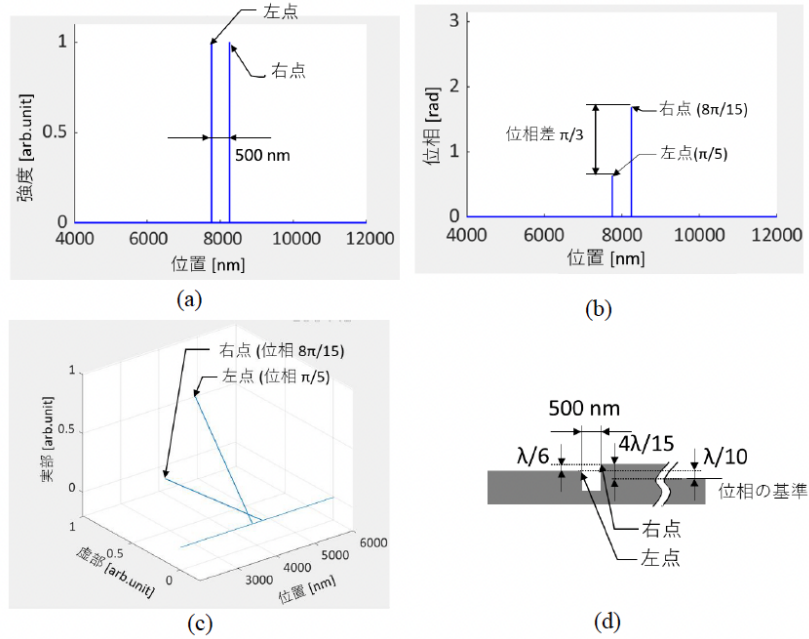


図2. 二点の複素振幅変調散乱体

(a)強度分布表示, (b)位相分布表示, (c)複素振幅分布表示, (d)相当する実試料例（高さの異なるエッジが複素振幅変調散乱体に相当）

表1. 超解像に用いた各種設定条件

波長 $\lambda$	405 nm
開口数 $NA$	0.2
計算範囲	16000 nm
斜入射光の入射角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ (照明周波数 $p_1, p_2, p_3$ )	12, 33, 60 度 ( $5.1 \times 10^{-4}, 1.3 \times 10^{-3}, 2.1 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ )
定在波の位相 $\phi_1, \phi_2$	0, $\pi/2$ rad
定在波照明と参照光の振幅比 $A_0 : A_r$	100:1
参照光の位相 $\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{13}, \psi_{21}, \psi_{22}, \psi_{23}$	0, $\pi/2, \pi, 0, \pi/2, \pi$ rad
計算最小単位	2 nm
ガウス窓パラメータ $g$	0.04

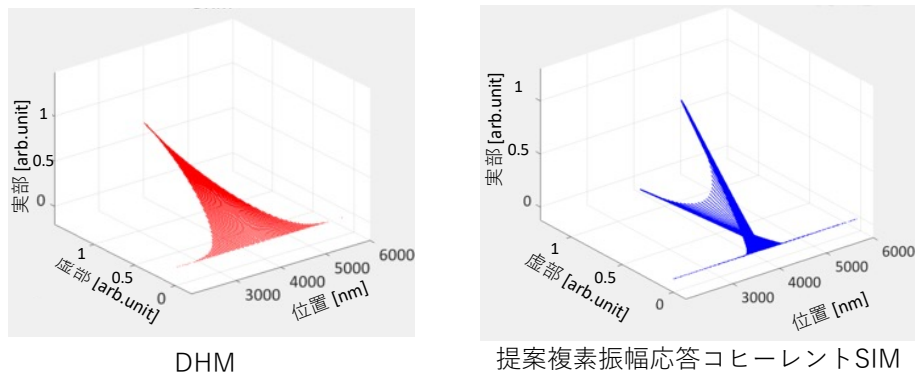


図3. 再構成結果比較, (左)従来の位相振幅観察顕微鏡（デジタルホログラフィ顕微鏡：DHM）, (右) 提案手法

次に微細周期状複素振幅サンプルへの適用事例を示す．図 4 は振幅一定分布で位相周期変化試料の複素振幅分布の観察例（800nm 周期で位相が  $\pi/5$  変動する試料）である．位相周期分布が回折限界より細かい構造となっているため，DHM では，位相一定・強度一樣の分布が取得されることになるが，提案手法では，適切に周期状位相分布が観察されていることが分かる．

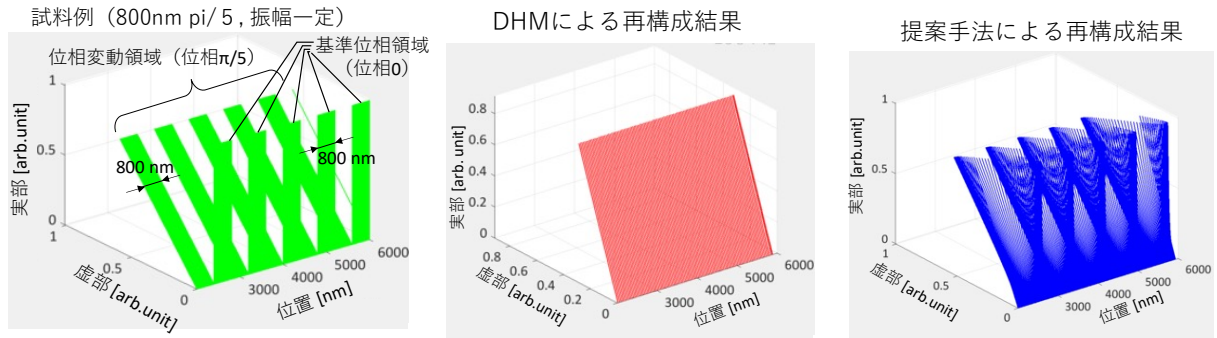


図 4. 振幅一定分布で位相周期変化試料の複素振幅分布の観察例

以上のように，提案顕微法は，通常の強度分布のみを観察する顕微鏡とは異なり，位相分布の可視化が可能であることに加え，回折限界の超越が実現されていることが分かる．そこで，一般的により困難だと考えられる，振幅一定で位相周期変化試料において，微細位相欠陥の検出が可能であるかを検証した．図 5 は，20nm 周期で位相（ $\pi/3$ ）変動する超微細位相周期試料（振幅変調は一定）である．ここで，本来あるべき位相変動が欠落するといった位相欠陥があった場合を想定した（図 5）．同じく位相計測性を持っているが回折限界に支配される DHM では，全く位相欠陥の検知は困難であるが，提案手法では，位相欠陥部において，応答変動が確認される．複素振幅表示（図 6）から，提案手法によって 20nm といた微細位相欠陥を明確に可視化可能であることが分かる．

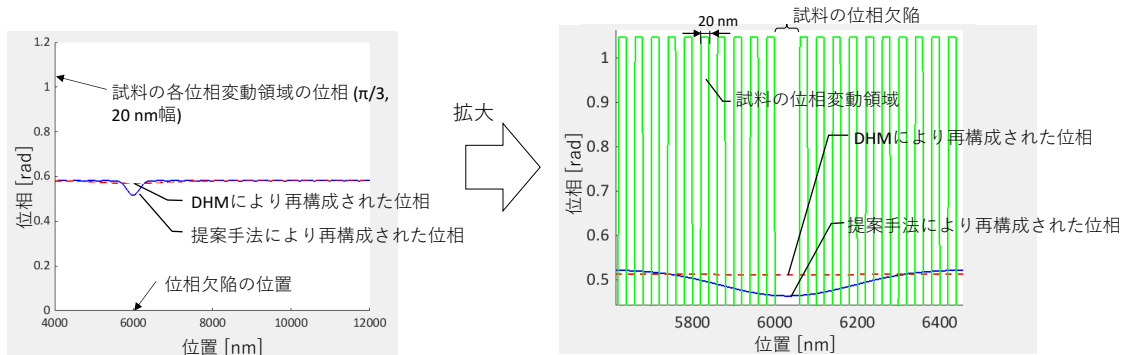


図 5. 振幅一定分布・位相周期変化試料の位相欠陥検出例

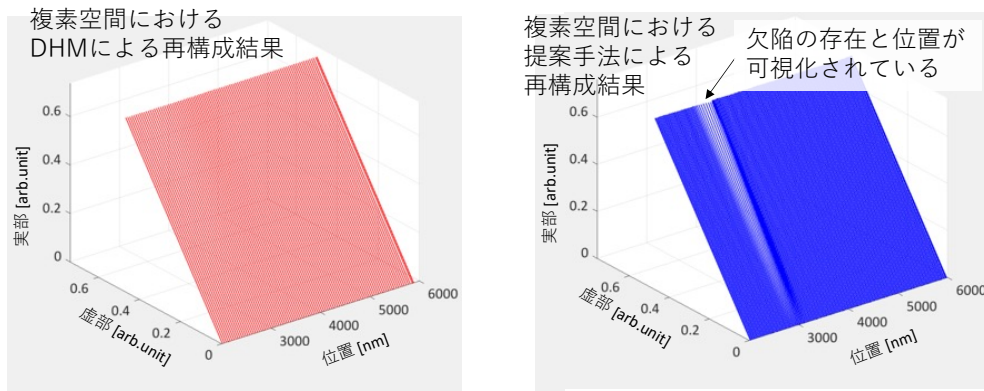


図 6. 図 5 の位相欠陥検出例の複素振幅表示（左は比較用の DHM 結果，右が提案手法）

提案コヒーレント SIM を実現する構造照明コヒーレント超解像顕微鏡システム（図 7 に模式図、図 8 に写真）を開発した。開発システムを用いて、最も重要な帯域拡大機能が発現できる（図 9）ことが確認された。今後は開発装置によるコヒーレント超解像特性詳細の解析を進める。

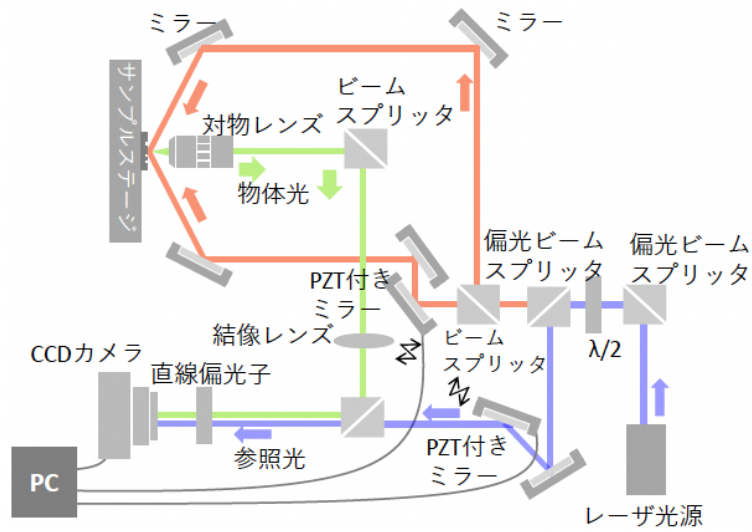


図 7. 提案コヒーレント SIM を実現する構造照明コヒーレント超解像顕微鏡システム

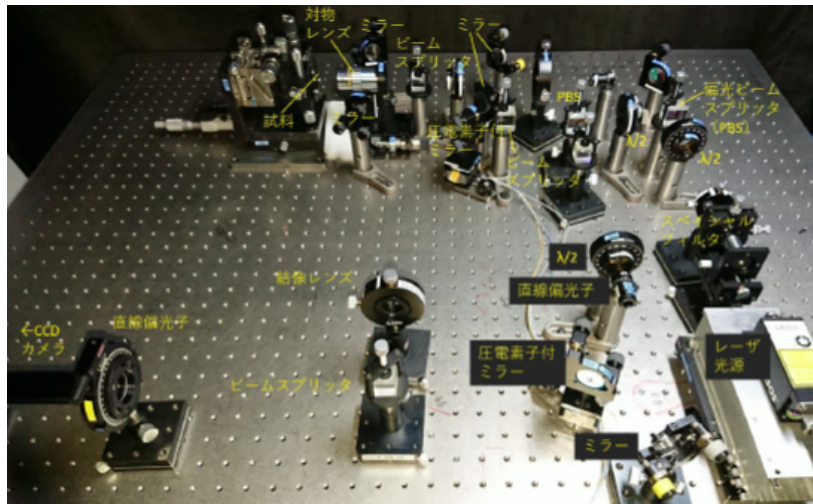


図 8. 開発装置の写真

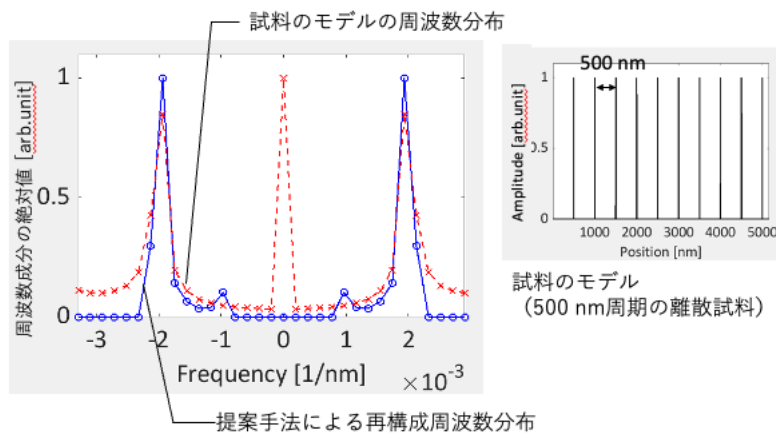


図 9. 開発装置による帯域拡大観察実証実験

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kume Hiromasa, Michihata Masaki, Takamasu Kiyoshi, Takahashi Satoru	4. 巻 67
2. 論文標題 Numerical analysis on high resolution optical measurement method with long working distance objective for in-line inspection of micro-structured surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 232 ~ 247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2020.09.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Guan Yizhao, Kadoya Shotaro, Michihata Masaki, Takahashi Satoru	4. 巻 18
2. 論文標題 The FDTD analysis for dark field in-process depth measurements of fine microgrooves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement: Sensors	6. 最初と最後の頁 100257 ~ 100257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.measen.2021.100257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Guan Yizhao, Kume Hiromasa, Kadoya Shotaro, Michihata Masaki, Takahashi Satoru	4. 巻 144
2. 論文標題 The FDTD Analysis of Near-Field Response for Microgroove Structure With Standing Wave Illumination for the Realization of Coherent Structured Illumination Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Manufacturing Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 031004-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4051827	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kume Hiromasa, Michihata Masaki, Takahashi Satoru	4. 巻 80
2. 論文標題 Theoretical analysis on coherent optical super-resolution method for inspection of functional micro-structured surfaces with complex-amplitude-response distribution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 138 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2022.11.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 友藤康司, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋哲
2. 発表標題 コヒーレント結像型構造照明顕微法における機械学習を用いた画像再構成の基礎的検討
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 管一兆, 増井周造, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋哲, 岩見健太郎, 稲秀樹
2. 発表標題 Near-field Phase Analysis of Periodic Microgroove Structure for Metasurface Design based on FDTD Simulation
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Takahashi
2. 発表標題 Challenge of nano optical technology beyond the diffraction limit for nano/micro manufacturing
3. 学会等名 The 7th International Conference on Nanomanufacturing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yizho Guan, Shotaro Kadoya, Masaki Michihata, Satoru Takahashi
2. 発表標題 The FDTD analysis for dark field in-process depth measurements of fine microgrooves
3. 学会等名 XXIII World Congress of the International Measurement Confederation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yizhao Guan, Masahiro Kume, Shotaro Kadoya, Masaki Michihata, Satoru Takahashi
2. 発表標題 The FDTD analysis of near-field response for microgroove structure with standing wave illumination for the realization of coherent structured illumination microscopy
3. 学会等名 ASME 2021 16th International Manufacturing Science and Engineering Conference 60409 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yizhao Guan, Masahiro Kume, Shotaro Kadoya, Masaki Michihata, Satoru Takahashi
2. 発表標題 The FDTD analysis for diffraction limited microgroove structure with standing wave illumination for the realization of coherent structured illumination microscopy
3. 学会等名 Optics and Photonics International Congress 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 管 一兆, 久米 大将, 門屋 祥太郎, 道畑 正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 定在波照明における微細開口の近接場光応答解析 (第2報) The FDTD analysis of near-field response for microgroove structure with standing wave illumination –The relationship of microgroove depth and near-field phase response–
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 管 一兆, 久米 大将, 門屋 祥太郎, 道畑 正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 コヒーレント結像型SIM実現を目指した微細構造表面のFDTD光学応答解析
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Satoru Takahashi
2. 発表標題 Nano Optical Measurement for Next-Generation Nano/Micro Manufacturing based on Localized Light Energy Control
3. 学会等名 SPIE OPIC OPTM2020 : SPIE Conferences at Optics & Photonics International Congress 2020 Optical Technology and Measurement for Industrial Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 久米大将, 道畑正岐, 高増潔, 高橋哲
2. 発表標題 定在波照明を用いた表面微細加工構造の長作動距離超解像欠陥検査
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計3件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	門屋 祥太郎  (Kadoya Shotaro)  (60880234)	東京大学・先端科学技術研究センター・特任助教   (12601)	
研究分担者	道畑 正岐  (Michihata Masaki)  (70588855)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授   (12601)	
研究分担者	西川 正俊  (Nishikawa Masatoshi)  (30444516)	法政大学・生命科学部・准教授   (32675)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------