

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18668

研究課題名（和文）1nm表面異物欠陥の自律探索を実現する動的位相差検出型・近接場液相プローブ計測法

研究課題名（英文）Near-field liquid phase probing method with dynamic optical phase detection for autonomous search for 1 nm particulate contamination

研究代表者

高橋 哲（Takahashi, Satoru）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30283724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：従来光学的散乱型計測法原理では20 nm 程度が物理的検出限界となっていた半導体加工表面のナノ付着異物計測法について新光学システムの提案，開発を目指す．具体的には，基板上に滴下した揮発性不活性溶媒の液相界面とナノ異物との近接場における力学的・光学的相互作用を，並列情報処理性，現場適用性の高い遠隔場光学技術で取得することで，非破壊性，高速性を維持したまま，従来異物サイズ検出限界を打破可能な新概念近接場計測プローブ法の開発において，特に動的位相差検出が可能な新しい概念の光学システムの適用を提案するとともに，基礎実験装置を開発し，その有効性を検証した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

今日，高性能半導体デバイスを高い信頼性をもって生産することは，持続的社会的の実現にあたり，ますます重要となっている．半導体デバイスの高性能化のためには，配線パタンの微細化が必要となり，そのためには，半導体デバイスの基板となるベアSiウエハ表面上のナノスケールの異物管理が不可欠となっている．本研究成果は，従来困難だったベアSiウエハ表面上のナノスケール欠陥の検出可能性を示唆するものであり，大きな社会的意義を有する．

研究成果の概要（英文）：We propose and develop a new optical system for the measurement of nanoparticle defects on ultra-smooth surfaces, which is physically limited by the light scattering detection principle conventionally applied in semiconductor processes. Specifically, the mechanical and optical interactions in the near-field between the nanoparticle defects and the liquid-phase interface of volatile inert solvent droplets on the substrate are acquired using far-field optical system. In this research project, the application of a new concept of high sensitive dynamic phase detection was proposed. In order to verify the feasibility of the proposed concept, we developed the fundamental experiment system, and verified its high sensitivity performance quantitatively.

研究分野：光製造科学

キーワード：異物検出 ナノ欠陥 ナノ異物 表面欠陥

1. 研究開始当初の背景

従来、半導体プロセスにおいて現場適用されてきた光学的散乱型計測法原理では、ナノ異物からの微弱な散乱光光量を暗視野観察で取得することにより異物評価を行う。ベアウエハ加工表面が理想的な鏡面であれば、暗視野観察光検出器の感度を上げることで nm スケールの異物検出も可能となるが、実際は、ベアウエハ加工表面もごく僅かな表面粗さ(サブ nm 程度のマイクロラフネス)が存在するため、集光レーザ内のマイクロラフネスからの微弱散乱光の光量以下を下回るナノ異物散乱光の検出は原理的に困難となる。結果として、現状、光学的散乱型計測法原理では 20 nm 程度がナノ異物の散乱限界となっており、これは光検出器の高感度化を行っても解決のできない本質的な物理限界であるということが出来る。研究代表者らは、これまで、上述の物理限界を有さない、新しい計測原理の近接場液相プローブによるナノ異物検出法を提案し、その基本概念について、特に理論的アプローチにより検証を進めていた。

2. 研究の目的[ ]

図 1 に、研究代表者らが提案している自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出法の概念図を示す。上述のように従来法(図 1(a))では、レーザ照射エリアにある極微小な表面粗さからの微小散乱光に、信号光の異物散乱光が埋もれることで、最小検出可能感度が決定される。散乱体としての物理的なサイズは大きく異なるにも関わらず、20nm 程度の異物がサブマイクロメートルといった極微小なマイクロラフネスからの散乱光に埋もれるのは、レーザ照射スポットサイズの最小値が光学的回折限界のために限界があること、また、顕微光学系で、やはり回折限界以下の面内情報を分離して検出することができないことによる。すなわち、異物に光をあて、その応答を光学系で取得する以上、どうしても、一定面積のマイクロラフネスからの光学応答と一緒に検出せざるをえない。一方、自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出法(図 1(b))では、散乱体としての物理的なサイズが、異物とマイクロラフネスで、大きく異なることに着目したものである。同検出法においては、不活性揮発液相を、Si ウエハ表面に滴下する。この液相の揮発時の界面は、マイクロラフネスより十分大きなナノ異物の存在により、界面厚さ方向にナノスケールでの緩やかな分布として変動を及ぼされることが理論的に確認されている。提案手法は、この液相の揮発時の界面挙動を、面内一括計測性に優れた光学機器で取得する。一般に光学系は、前述のように、回折限界により面内の分解能は半波長程度が限界となるが、垂直方向の分解能は、干渉等に代表されるように位相成分高精度計測が可能であるので、サブナノスケールの変動も検出可能である。特に本申請研究においては、この液相変動の検出に動的位相差検出法を適用することを提案し、実際に実験システムを開発して、実験的見地から提案手法の有効性の検証を試みる。

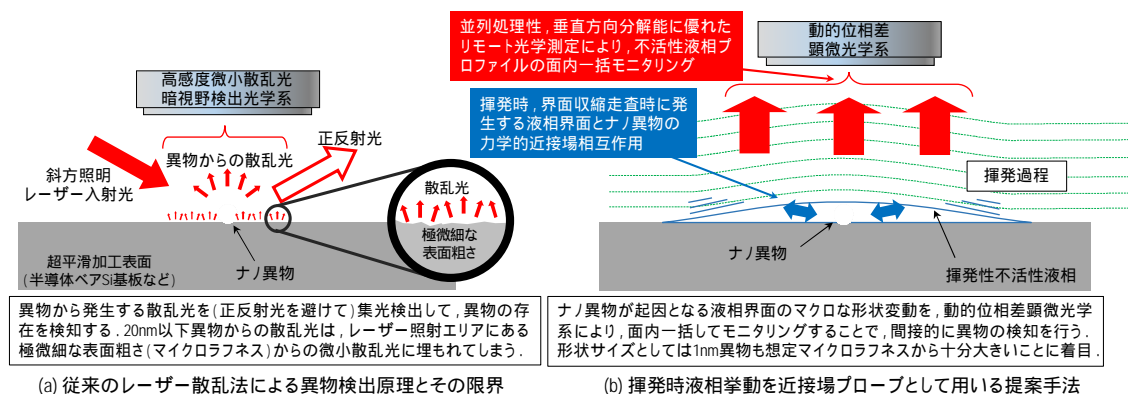


図 1. 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出法の概念図 [ ]

3. 研究の方法[ , ]

図 2 に、提案する動的位相差検出法によるナノ異物変動液相の高感度検出の概念図を示す。位相差顕微法は直接光を位相変調させた上で、直接光と回折光成分を干渉させ、微小な位相変動分布を強度分布として可視化する顕微法である。すなわち、ナノ異物の存在により、液膜形状に微妙な変動が生じると、位相差顕微法の原理により、光学的強度変調として高感度検出できることが期待される(図 2)。この際、通常の  $1/2$  の位相差に加えて、 $3/2$  の位相差印加像も用いることができればさらなる感度向上(2倍)が可能となる。図 3 は、本申請研究で開発を行った動的位相差検出型・近接場液相プローブ計測基礎実験装置である。通常の位相差顕微法で用いられる静的な位相変調素子の代わりに、空間位相変調素子 LCOS-SLM を用いて動的空間位相変調を実現する光学システムとなっている。試料面に対するフーリエ変換面を LCOS-SLM 面までリレー光学系を介して伝送し、該当面の位相変調を実現することで提案手法の有効性検証を試みる。

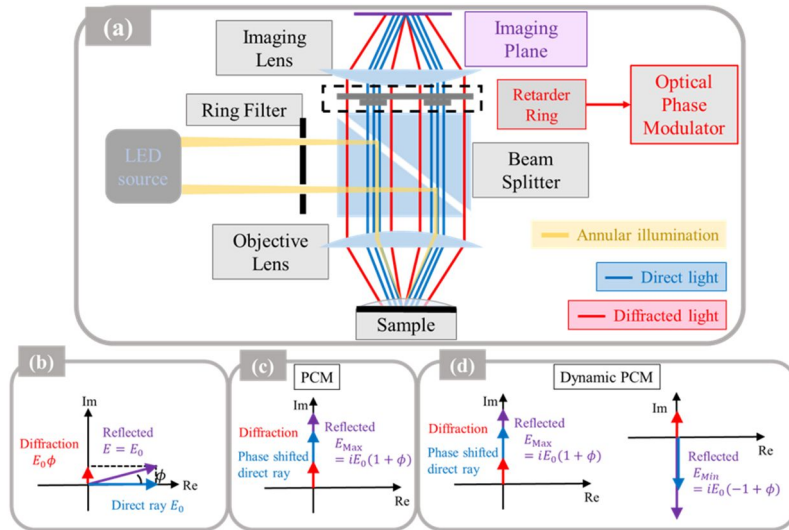


図 2. 提案する動的位相差検出法によるナノ異物変動液相の高感度検出 [ ]

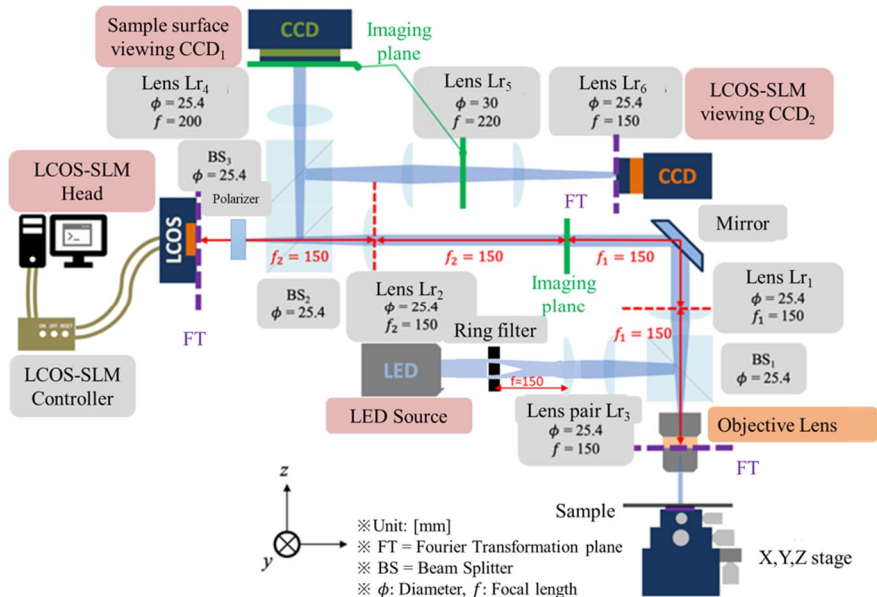


図 3. 動的位相差検出型・近接場液相プローブ計測基礎実験装置 [ ]

#### 4. 研究成果 [ , ]

液相変動挙動の光学的検出感度向上を厳密に定量議論するために、動的に揮発する液相ではなく、静的な擬似液相薄膜（レジスト）を検出サンプルとして採用した。具体的には、SU-8 と PGMEA を 1 対 7 の割合で希釈したレジスト液を用いて、3000 rpm でスピナーコートを行ない、基板上異物による液膜変動の光学的検出能を評価した。図 4(a)～(g)は、回折光成分の位相を LCOS-SLM によって、直接光位相から相対的に 0 から 2π まで変動させたときの観察顕微鏡像である。特に図 4(h)は、破線円内の一点について、位相変動中の強度変動をプロットしたものであり、正弦曲線状の変動が観察されることから、理論どおりの特性が確認された。図 5 は、変調強

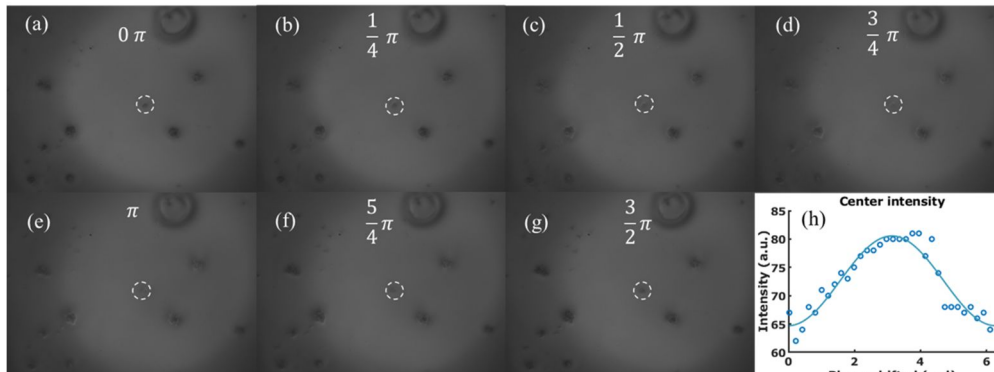


図 4. 位相変調量と顕微鏡観察像の関係 [ ]

度を面内でプロットしたものである。ラインプロファイル結果から、一般的な位相差顕微法(b)と比較して、提案動的位相差顕微法(a)では、同一膜厚変動に対して約2倍以上の強度変動感度向上(6.4%から14.8%へ)が確認された。理論的に、5 nm 異物による膜厚変動は、1.5 %程度と比較的、微弱であることが予想されているが、この提案動的位相差顕微法の適用で、5 nm 以下の異物についても、大きく検出可能性が向上することが期待される。

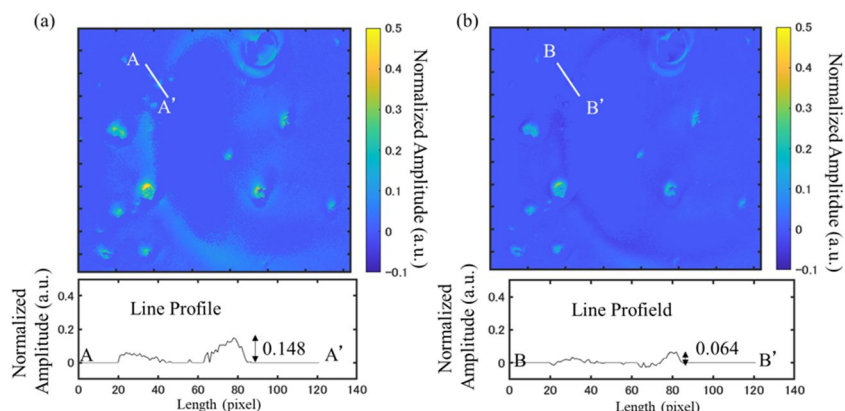


図5. 変調強度マップによる感度向上の様子  
(a) 提案動的位相差顕微法, (b) 一般的な位相差顕微法 [ ]

<引用文献>

高橋哲, ナノ異物欠陥の高分解能・高感度・光学的計測法開発の最新動向, トライボロジー, 第67巻, 第11号, 2022, 776-781.  
 管一兆, 増井周造, 門屋祥太郎, 道畑正岐, 高橋哲, 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究(第11報) 空間光位相変調による液相プローブ高感度検出, 精密工学会春季学術講演会講演論文集, 2022, 306.  
 Yizhao Guan, Shuzo Masui, Shotaro Kadoya, Masaki Michihata, Satoru Takahashi, Smart optical measurement probe for autonomously detecting nano-defects on bare semiconductor wafer surface: highly sensitive observation system using phase-contrast microscopy with a spatial light modulator, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2368, Issue 1, 2022, id.012014, 7 pp.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 高橋 哲	4. 巻 67
2. 論文標題 ナノ異物欠陥の高分解能・高感度・光学的計測法開発の最新動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 776 ~ 781
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18914/tribologist.67.11_776	査読の有無 無
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 Y. Guan, S. Masui, S. Kadoya, M. Michihata and S. Takahashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Smart optical measurement probe for autonomously detecting nano-defects on bare semiconductor wafer surface: highly sensitive observation system using phase-contrast microscopy with a spatial light modulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Ser. 2368	6. 最初と最後の頁 12014
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2368/1/012014	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Satoru Takahashi
2. 発表標題 Super resolution optical measurement for functional microstructures beyond the diffraction limit
3. 学会等名 15th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII) 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoru Takahashi
2. 発表標題 Challenge of advanced optical technology beyond the diffraction limit for nano/micro manufacturing
3. 学会等名 The China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP) 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yizhao Guan, Shuzo Masui, Shotaro Kadoya, Masaki Michihata and Satoru Takahashi
2. 発表標題 Smart optical measurement probe for autonomously detecting nano-defects on bare semiconductor wafer surface: highly sensitive observation system using phase-contrast microscopy with a spatial light modulator
3. 学会等名 The 11th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅 一兆, 増井 周造, 門屋 祥太郎, 道畑 正岐, 高橋 哲
2. 発表標題 自律的欠陥探索・分裂型マルチプローブによるナノ異物検出に関する研究(第11報) -空間光位相変調による液相プローブ高感度検出-
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

〔図書〕 計0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・大学院工学系研究科(工学部)・助教    (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	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)	

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