

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656097

 研究課題名（和文）高アスペクト次世代ナノ微細構造加工表面の非破壊内部情報計測に関する
 挑戦的研究

 研究課題名（英文）Challenging exploratory research on non-destructive internal
 measurements on next-generation functional surface with high aspect structures

研究代表者

高橋 哲 (TAKAHASHI SATORU)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30283724

研究成果の概要（和文）：従来，断面を切りだした後，電子顕微鏡等で高分解能観察するといった破壊計測をせざるをえなかったナノインプリント加工表面等の高アスペクト次世代ナノ微細構造加工表面の非破壊内部情報計測を目指した．プラズモン共鳴を利用した近接場光応答を検出することで，ナノインプリント加工表面内部情報（残膜厚）の定量評価が可能であることを，マクスウェル方程式に基づいた計算機シミュレーションおよび基礎実験により示した．

研究成果の概要（英文）：

We propose a novel nano thickness inspection method of residual layer film of nanoimprint lithography, allowing nondestructive evaluation of residual layer thickness. In the proposed method, we applied near-field optical enhancement of a fine metal tip as a high spatial resolution measurement probe, with which we can get near-field optical response generated by dynamic interaction of the tip, thin residual layer film and a Si substrate. By performing theoretical analyses based on finite-difference time-domain method and fundamental experiments using a newly developed near-field optical response detection system, we verified the feasibility of the proposed method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：精密位置決め，加工計測

1. 研究開始当初の背景

次世代半導体デバイスの高密度・高集積化を実現する超微細パターン形成技術の最有力候補の一つとして，ナノインプリントリソグラフィ（NIL：Nanoimprint Lithography）が挙げられている．NILは優れた微細加工性，量産性を有しているが，加工プロセス中において，パターン間残膜の生成（図 1）が避け

られず，半導体リソグラフィ技術として適用する場合，この残膜厚のばらつきが形成線幅に影響を及ぼし，結果として半導体デバイスの動作不良の原因となることが大きな問題となっている．そのため，NILを，高い信頼性をもって次世代半導体超微細パターン形成技術として適用するためには，残膜厚を高精度に非破壊測定可能な手法が不可欠とな

っている。このNIL 残膜に代表されるように、次世代マイクロ生産科学においては、高アスペクト微細加工構造内における非破壊内部情報計測技術の開発が強く求められている。

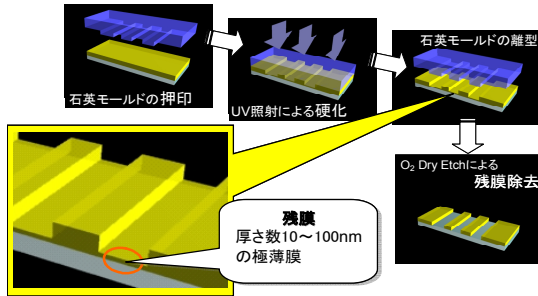


図 1. ナノインプリント加工時に生じる溝構造底部の残膜

2. 研究の目的

現在、FIB (Focused Ion Beam) 等により断面を切りだし、走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) や透過電子顕微鏡 (TEM : Transmission Electron Microscope) 等を用いて高分解能拡大観察するといった破壊的計測手法に限定されていた NIL 残膜評価等の高アスペクト次世代ナノ微細加工表面の非破壊内部情報計測を、プラズモン共鳴を利用した近接場光応答検出により実現可能であるか理論・実験の両面から検討する。

3. 研究の方法

一般に光エネルギーは材料透過性を利用することで材料内部情報の取得が可能である。しかし、回折限界以下の溝幅を有する微細溝構造において、溝底にのみ光エネルギーを集光することは原理的に困難である。そのため、図 2 に示すように先端が鋭敏な近接場光プローブを適用し、先端部においてプラズモン共鳴を発生させることでプローブ先端部に局在した光エネルギーを生成させる。この局在光エネルギーと残膜を通したシリコン基板との相互作用応答を遠隔場高感度観察することにより残膜厚評価を試みる。本申請研究において、効率的なプラズモン共鳴発生条件ならびに遠隔場応答による内部残膜厚情報取得可能性について、電磁場解析シミュレーションおよび基礎実験について調べた。

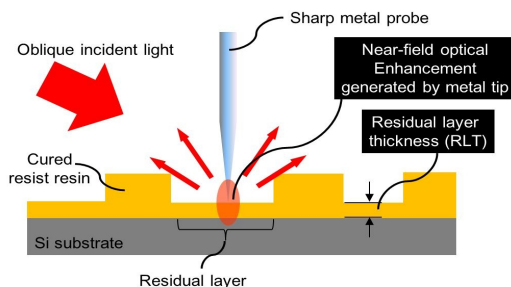


図 2. 提案手法概念図

4. 研究成果

(1) FDTD 法とフーリエ光学を融合することで、高アスペクト微細構造光学応答を、近接場応答に留まらず遠隔場応答としても算出可能な数値演算シミュレータを構築した。これにより、高アスペクト微細構造において支配的な応答が予想されるプラズモン共鳴を起因とした、試料近傍の近接場三次元電磁場ベクトルならびに、試料遠方の遠隔場検出像の両者の解析が可能となった (図 3)。

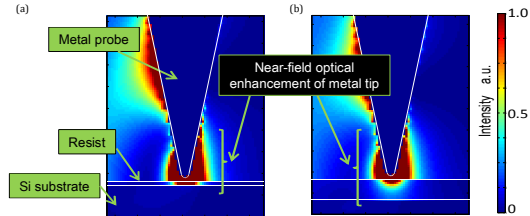


図 3. 数値演算シミュレータで確認されたプラズモン共鳴により局在増強された近接場光分布例

(2) 高アスペクト次世代ナノ微細加工表面として、次世代半導体プロセスとして期待されている NIL 加工表面を対象とし、内部情報に相当する加工残膜の評価が可能であるか、構築計算機シミュレータならびに、基礎実験により、理論・実験の両面から検討を行った。数値演算により、P 偏光入射光において、プラズモン共鳴現象を励起させることで励振電場をレジスト内部に効率的に侵入させることができ、内部残膜厚情報を遠隔伝搬光学情報として取得できる可能性があることが分かった (図 4)。

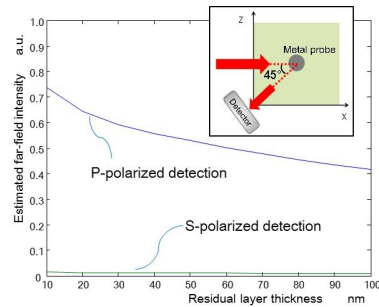


図 4. 数値演算シミュレータで確認された近接場光応答の残膜厚依存性

(3) 微細ナノ空間で生成される近接場応答を高分解能で高速検出するための遠隔場検出法を提案し、有効性を検証した。逐次超解像演算を可能とする新概念構造照明を適用することで、回折限界を超越した試料面光エネルギー分布の高速遠隔場取得が可能であることを示した。

(4) 高い SN 比での近接場応答を取得可能なロックイン検出同期型プローブタッピング機構とシアフォース制御を組み込んだ近接場応答検出基礎実験装置を構築 (図 5) し、

理論解析で推定された実験条件においてプラズモン共鳴近接場光応答の取得が可能であることを示した。(図6)

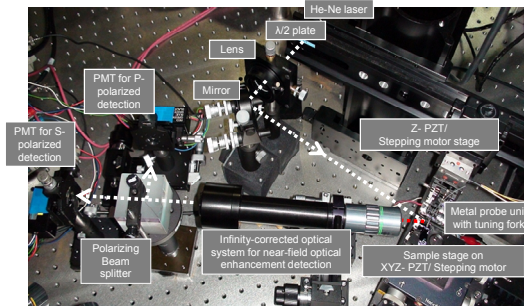


図5. プラズモン共鳴励起型近接場光応答検出基礎実験装置

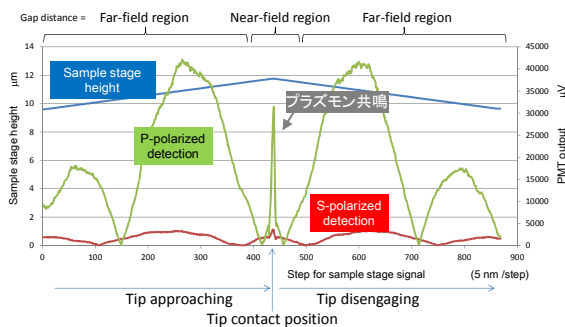


図6. プローブ-サンプル距離と近接場光応答との関係

(5) 提案手法の実践的な有効性を検証するため、開発手法を実際のナノインプリント残膜測定へ適用した結果、従来、断面を切りだした後、電子顕微鏡観察を行わないと評価が困難だった、10nm厚内部残膜と50nm厚内部残膜の非破壊弁別に成功した。(図7)

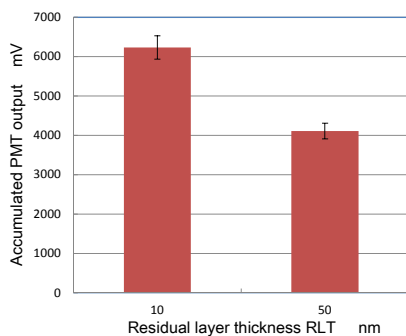


図7. 残膜厚と近接場光応答との関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① S. Takahashi, R. Kudo, S. Usuki, K. Takamasu: Super resolution optical measurements of nanodefects on Si

wafer surface using infrared standing evanescent wave, CIRP Annals, 60/1, 523-526, 2011, 査読有り, DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.053

- ② R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi, K. Takamasu: Influence of standing wave phase error on super-resolution optical inspection for periodic microstructures, Meas. Sci. Technol., 23, 0540071-3, 2012, 査読有り, DOI: 10.1088/0957-0233/23/5/054007
- ③ S. Takahashi, Y. Ikeda, K. Takamasu: Study on nano thickness inspection for residual layer of nanoimprint lithography using near-field optical enhancement of metal tip, CIRP Annals, 62/1, 2013, 査読有り, DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.020

[学会発表] (計12件)

- ① R. Kudo, S. Usuki, S. Takahashi, K. Takamasu : Experimental analysis of influence of error on super-resolution optical inspection using standing wave, 10th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments, 2011年7月1日, Daejeon, Korea.
- ② 工藤良太, 高橋哲, 高増潔: 近赤外エバネッセント定在波を用いた半導体ウエハ表面の超解像光学式欠陥検査(第2報) - フィルタによるエラーの影響抑制 -, 2011年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2011.9.22, 金沢
- ③ Kiyoshi Takamasu, Haruki Okitou, Satoru Takahashi, Mitsuru Konno, Osamu Inoue, Hiroki Kawada: Sub-nanometer line width and line profile measurement for CD-SEM calibration by using STEM, SPIE Advanced Lithography 2012, 2012.2.15, Sanjose, USA
- ④ 天野佑基, 工藤良太, 高橋哲, 高増潔 : 定在波シフトによる半導体ウエハ表面の超解像光学式欠陥検査 (第13報) - FDTD法を用いた微細配線の散乱特性解析 -, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2012.3.16, 東京
- ⑤ 工藤良太, 高橋哲, 高増潔, 臼杵深: 定在波シフトによる半導体ウエハ表面の超解像光学式欠陥検査 (第14報) - コヒーレント結像逐次再構成型超解像法 -, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2012.3.16, 東京
- ⑥ Satoru Takahashi : Super-Resolution

Visual Inspection for Microstructures Manufacturing, The 3rd International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2012. 8. 1, 桂林 (中国)

- ⑦ R. Kudo, S. Takahashi, K. Takamasu : DESIGN VALUE USE TYPE SUPER-RESOLUTION OPTICAL INSPECTION FOR MICROFABRICATED STRUCTURE DEFECTS BY USING STANDING WAVE ILLUMINATION SHIFT, XX IMEKO World Congress, 2012. 9. 10, 釜山 (韓国)
- ⑧ 沖藤春樹, 高橋哲, 高増潔 : 半導体の線幅標準に関する研究 (第 9 報) -STEM 画像を用いたレジスト形状の測定-, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2012. 9. 14, 福岡
- ⑨ 工藤良太, 高橋哲, 高増潔 : 定在波シフトによる半導体ウエハ表面の超解像光学式欠陥検査 (第 15 報) -コヒーレント結像逐次再構成型超解像装置の開発-, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2012. 9. 14, 福岡
- ⑩ 沖藤春樹, 高橋哲, 高増潔 : 半導体の線幅標準に関する研究 (第 10 報) -AFM 及び STEM によるレジスト形状測定-, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2013. 3. 13, 東京
- ⑪ 工藤良太, 横関宏樹, 高橋哲, 高増潔 : スポット照明の重複シフトによる光学式超解像検査法-提案手法の理論的検討-, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2013. 3. 13, 東京
- ⑫ H. Yokozeki, R. Kudo, S. Takahashi, K. Takamasu: Study on lateral resolution improvement of laser-scanning imaging for nano defects inspection, The 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments(オーラル採択済み), 2013. 7. 3, アーヘン (ドイツ)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称 : 顕微観察装置
発明者 : 高橋哲, 工藤良太, 高増潔
権利者 : 東京大学
種類 : 特許権
番号 : 特願 2012-178326
出願年月日 : 2012. 8. 10
国内外の別 : 国内

名称 : 照明装置および顕微観察装置
発明者 : 高橋哲, 高増潔, 工藤良太, 臼杵深
権利者 : 東京大学
種類 : 特許権
番号 : PCT/JP2013/054821

出願年月日 : 2013. 2. 25
国内外の別 : 国外

[その他]
ホームページ等
<http://www.nanolab.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 哲 (TAKAHASHI SATORU)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号 : 30283724

(2) 研究分担者

高増 潔 (TAKAMASU KIYOSHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号 : 70154896

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :