

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600117

研究課題名(和文) フォトン原子間力の超高感度化・超高分解能化

研究課題名(英文) High sensitive and high resolution imaging of the optical near field based the surface photovoltage

研究代表者

李 艶君 (Li, yanjun)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50379137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：光の回折限界を超える原子分解能で画像化は、極めて挑戦的な研究課題である。しかしながら、これまで原子分解能の光学特性の画像化は行われていない。本研究では、試料表面に局在する近接場光分布を原子分解能で観察する方法について検討した。この方法では、近接場光分布の中にシリコン探針先端を挿入した場合に生じる表面光起電力を力として測定する。その結果、サファイア(0001)表面の近接場光を原子分解能でイメージングすることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The atomic-resolution optical imaging that overcomes the diffraction limit of light is a challenging task. However, atomic-resolution imaging of the optical field has not yet been achieved. We investigate the atomic-resolution imaging of the optical near-field on a surface. In this method, the surface photovoltage of the silicon tip apex induced by the optical near-field on the surface is measured. For the first time, we achieve atomic resolution imaging of the optical near-field on the sapphire -Al₂O₃ (0001) surface. We observe the strong tip-sample distance dependence of the surface photovoltage. This success is a promising development in the exploration of atomic-scale physical and chemical interactions between light and atoms/molecules and offers deeper insight into the various photonic processes and functions on surfaces.

研究分野：走査プロブ顕微鏡

キーワード：近接場光 AFM 原子分解能

1. 研究開始当初の背景

回折限界を越える高分解能な光学顕微鏡を開発しようとする試みが行われてきた。具体的には、光照射により物質に誘起された分極がその近傍につくる電磁場、すなわち、物質近傍に局在する光（近接場光）を検出し、高分解能な光学顕微鏡を実現しようとするものである。しかし、先鋭化した光ファイバや金属探針を用いる従来の方式では、原子分解能(0.2nm以下)での観察は実現されていない。

申請者は、過去10年以上にわたり、引力を用いて物質表面の構造を原子レベルで観察する原子間力顕微鏡に関する先駆的な研究を推進し、力学的に原子種を同定できることなどを明らかにしてきた。

最近、申請者は、物質表面に局在する光（近接場光）の強度分布を力として検出するという新しい概念の光学顕微鏡について研究を行っている（図1）。この顕微鏡では、原子間力顕微鏡の力センサーである半導体探針を近接場光の中に挿入し、半導体探針の先端に電子・正孔対を生成させ、その結果生じる半導体探針先端の表面電位（光起電力）を力として検出する。この方式は、従来の方式で問題となっていた光の伝搬損失や集光損失がほとんどないため、近接場光分布を原子分解能で測定できる可能性が高い。

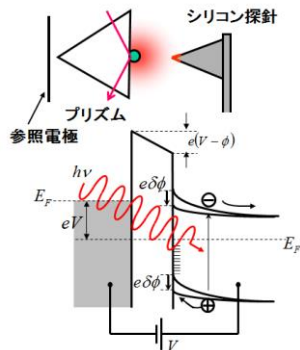


図1 力を用いて近接場光を検出する新しい光学顕微鏡

2. 研究の目的

本研究は、「物質表面の個々の原子を高分解能に観察可能な次世代の光学顕微鏡を開発すること」を目的とする。具体的研究課題は、以下の3点である。

- 1) 近接場光を力として高感度・高分解能に測定するため、様々な構成要素を低ノイズ化する。
- 2) 近接場光を原子分解能で観察するための条件を理論的・実験的に明らかにする。

原子レベルでの物質と光との相互作用に関する科学は、学術的研究課題の宝庫である。

本研究の成功により、従来の常識を覆す新しい物理現象や画期的な機能を発見できる可能性が高い。このような発見は、新しい概念に基づく新材料や新デバイスの創製につながる期待される。また、このような革新的な研究手法の出現は、光物性研究の仕方を質的に変える可能性がある。

3. 研究の方法

平成25年度は、まず、近接場光を力として高分解能に測定するための条件を理論的に検討する。次に、近接場光を力として高感度に測定するため、カンチレバーの変位検出計の低ノイズ化を実現する。また、カンチレバーの小振幅動作と高周波化を実現し、近接場光を力として高感度・高分解能に測定できるようにする。さらに、近接場光を高分解能に検出するため、バックグラウンド光を低減した光照射系を実現する。

平成26年度以降は、まず、試料表面の結晶構造による情報と近接場光による情報とを高精度に分離測定できるようにする。また、近接場光を力として高分解能に測定するための条件を実験的に検討する。

4. 研究成果

(1) 近接場光の最適観察条件の理論的検討

近接場光を高分解能に測定するために制限している因子（例えば、近接場光から力への量子変換効率や、カンチレバーの変位検出計の雑音、カンチレバーの熱振動、カンチレバーのバネ定数や振動振幅などの測定条件）を理論的に検討し、近接場光を力として高分解能に測定するための条件を求めた。

(2) カンチレバーの変位検出計の高感度化

近接場光を高感度に測定するため、カンチレバーの変位検出計（光ファイバ干渉計）の低ノイズ化を実現した。具体的には、これまで使用してきた変位検出計では、光源のモードホップノイズにより検出感度が制限されているので、半導体レーザに高周波変調を重ねることによりモードホップノイズを低減し、変位検出計の低ノイズ化（30fm/√Hz以下のノイズ密度）を実現した。

(3) カンチレバーの小振幅動作・高周波化による高感度化・高分解能化

近接場光による力を高感度・高分解能に測定するため、従来のカンチレバー（ばね定数 $k=40\text{N/m}$ 、共振周波数 $f=150\text{kHz}$ ）に比べて、ばね定数が大きく、共振周波数の高いカンチレバー（ $k=1,000\text{N/m}$ 、 $f=1\text{MHz}$ ）を導入し、小振幅振幅(0.1nm程度)での動作を実現した。

(4) バックグラウンド光を低減した光照射系の実現

近接場光を高分解能に検出するためには、バックグラウンド光を低減した光照射系を

現することが重要である。そこで、光学レンズやプリズム表面での不要反射が極限まで低減するように現有の装置の照射光学系を改良した。なお、照射光源としては、青色半導体レーザを使用した。

(5) 近接場光による力の高精度測定の実現

振幅変調された光をカンチレバー先端に照射し、カンチレバーの周波数シフトに現れる変調成分をロックインアンプで検出することにより、近接場光成分を測定する。ここでは、表面の結晶構造と近接場光分布とを完全に分離できることを実証した。

(6) 近接場光の最適観察条件の実験的検討

近接場光を最も高感度に測定するための条件を実験的に検討した。具体的には、周波数シフト曲線を測定し、次に、これを数値計算により力曲線に変換し、さらに、様々な振動振幅に対する周波数シフト曲線を導出した。この周波数シフト曲線に対する信号対雑音比を求め、最も感度の良くなる観察条件を求めた。

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 6 件)

1. Y. Sugawara, J. Yamanishi, T. Tokuyama, Y. Naitoh, and Y. J. Li,

“Atomic-Resolution Imaging of the Optical Near Field Based on the Surface

Photovoltage of a Silicon Probe Tip”

Phys. Rev. APPL. 3, 044020 (2015). 査読有.

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.044020

2. L. Kou, Z. Ma, Y. J. Li, Y. Naitoh, M.

Komiyama and Y. Sugawara,

“Surface potential imaging with atomic resolution by frequency-modulation Kelvin probe microscopy without bias voltage feedback”

Nanotechnol., Vol. 26, pp.195701 (7pages)

(2015). 査読有.

DOI:10.1088/0957-4484/26/19/195701

3. E. Arima, Y. Naitoh, Y. J. Li, S. Yoshimura,

H. Saito, H. Nomura, R. Nakatani and Y. Sugawara,

“Magnetic force microscopy using tip

magnetization modulated by ferromagnetic resonance”

Nanotechnol., Vol. 26, pp.125701 (6 pages)

(2015). 査読有.

DOI:10.1088/0957-4484/26/12/125701

4. J. Bamidele, S.H. Lee, Y. Kinoshita, R.

Turanský, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara,

I. Štich, L. Kantorovich

“Vertical atomic manipulation with dynamic

atomic-force microscopy without tip change via a multi-step mechanism” 査読有.

Nature communications 1-7(2014).

DOI: 10.1038/ncomms5476

5. J. Bamidele, Y. Kinoshita, R. Turanský, S.

H. Lee, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara,

I. Štich, and L. Kantorovich,

“Image formation and contrast inversion

in noncontact atomic force microscopy imaging of oxidized Cu(110) surfaces”

Phys. Rev. B 90, 035410 (2014). 査読有.

DOI: 10.1103/PhysRevB.90.035410

6. Z. Ma, L. Kou, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara,

“The stray capacitance effect in Kelvin

probe force microscopy using FM, AM and heterodyne AM modes”

Nanotechnol., Vol. 24, pp.225701 (8

pages) (2013). 査読有.

DOI:10.1088/0957-4484/24/22/225701

[学会発表] (計 7 件)

1. E. Arima, S. Takada, K. Isoyama, M.

Kaneiwa, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y.

Sugawara,

“Measurement of NiO(001) surface with

- magnetic exchange force microscopy using ferromagnetic resonance”,
NC-AFM 2013, August, 5-9, Maryland, USA
2. T. Tokuyama, M. Furukawa, S. Yamada, Y. Naitoh, Y. J. Li, and Y. Sugawara, ”Atomic resolution optical imaging of the α -Al₂O₃(0001) surface by measuring photon-induced force”,
NC-AFM 2013, August, 5-9, Maryland, USA
3. Y. Sugawara, T. Tokuyama, J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li, “Atomic-resolution Imaging of the Optical Near-field on the Au(111) Surface Using Photon-induced Force”,
NC-AFM 2014, August, 4-8, International Conference, Tsukuba
4. E. Arima, K. Isoyama, Y. Naitoh, Y. J. Li, Y. Sugawara, “Spin-sensitive imaging of NiO(001) surface by Magnetic Exchange Force Microscopy using Ferromagnetic Resonance” NC-AFM 2014, August, 4-8, International Conference, Tsukuba
5. 徳山貴士, 山西絢介, 内藤賀公, 李艶君, 菅原康弘,
“力検出を用いた近接場光学顕微鏡による局在光強度分布の測定”
2013 年秋季第 74 回応用物理学会学術講演会, 9/16-9/20, 同志社大学, 京田辺
6. 山西絢介, 徳山貴士, 内藤賀公, 李艶君, 菅原康弘
“力検出を用いた近接場光学顕微鏡による高分解能イメージング”
2014 年春季第 61 回応用物理学関係連合講演会, 3/17-20, 青山学院大学, 相模原
7. 徳山貴士, 山西絢介, 内藤賀公, 李艶君, 菅原康弘
“力検出を用いた近接場光学顕微鏡によ

る二次元光強度分布の測定”
2014 年秋季第 75 回応用物理学会学術講演会, 9/17-9/20, 北海道大学, 札幌市

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://nanophysics.ap.eng.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

(李 艶君 准教授)

研究者番号 : 50379137

(2) 研究分担者

(菅原 康弘 教授)

研究者番号 : 40206404