

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14320

研究課題名（和文）光周波数コムを用いた光の反射における運動量移行過程の測定

研究課題名（英文）Measurement of momentum transfer process during light reflection using optical frequency comb

研究代表者

谷 峻太郎 (Tani, Shuntaro)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：80711572

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は1ピコ秒未満の超短パルスレーザーが物体に照射されたとき、パルスの持つ運動量が物体に移行する過程の観測を目的としたものである。高強度の超短パルスレーザー照射のもつ運動量によりもたらされた形状変化を精密に測定することにより運動量移行の測定するため高強度超短パルス照射前後の3次元形状を比較可能な実験系を構築し、垂直方向に3ナノメートル以下の精度を実現した。結果として、複数パルスのレーザー照射に伴う形状変化がランジュバン方程式で記述可能であることを見出し、物質の力学的な性質の及ぼすが光と物質の相互作用に与える影響を定量化することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は光と物質の相互作用における運動量の移行過程を明らかにすることを目的として行ったものである。光の運動量とエネルギーの関係は物質における運動量とエネルギーの関係に比べると極めて小さいが、超短パルスレーザーを用いることで光と物質の相互作用時間を十分に小さくすると、関与する原子数が小さくなることによって、光の運動量の及ぼす影響が顕著になることが考えられる。このような影響はレーザー加工のように超短パルスレーザーを用いて物質を改変する際に重要となる。本研究により開発された実験手法は超短パルスレーザーによる物質の表面形状の変化を通じて、超短パルスと物質の相互作用を測定可能とするものである。

研究成果の概要（英文）：This study aims to reveal the momentum transfer process from ultrashort laser pulse to material when the laser pulse is focused onto the material. We have developed a system to measure the depth profile before and after strong laser pulse irradiation to measure such momentum transfer process, and achieved 3-nm-precision depth profile comparison. As a result, we found that changes in morphology induced by multiple-pulse laser irradiation can be described by the Langevin equation and succeeded to quantify the influence of mechanical properties to light-matter interaction.

研究分野：レーザー

キーワード：超短パルスレーザー 形状変化

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

1. 研究開始当初の背景

光が物体で反射される時、光子の運動量は $\hbar k \rightarrow -\hbar k$ となり、物体に $2\hbar k$ の運動量を渡す。すなわち、物体は光から力積を受け加速される(輻射圧)。光の反射を考える際、一般に物体は剛体とみなされ、重心運動量のみが議論される。一方、微視的には可視光と相互作用するのは質量の小さい電子であり、格子はほとんど関与しない。このため光の運動量はまず電子系に渡されたあと、電子-フォノン散乱によって格子系に渡され、フォノン-フォノン散乱の結果、最終的には格子全体、すなわち物質の重心運動へと渡される。

光の輻射圧により物体が運動量をもつことは19世紀にMaxwellにより理論的に示されたのち、Lebedevによって1901年に実験的に検証された。近年ではナノスケールのカンチレバーを用いた高感度な光の輻射圧測定が盛んに行なわれている[M. Antognozzi et al., Nature Physics 12, 731 (2016)]。これらの実験は光の輻射圧を物体の変位として測定するため、反射の基礎過程である光子から電子への運動量移行過程、および電子系から格子系への運動量移行過程を測定することは原理上不可能である。本研究ではサブピコ秒のタイムスケールでは運動量が重心系にまで行き渡らない点に着目し、下記の研究を行った。

2. 研究の目的

光の反射に伴う運動量の移行過程、すなわち光子から電子系、電子系から格子系への運動量移行のダイナミクスを明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

当初、研究代表者は光周波数コムを用いることで精密な光周波数の測定が可能となることを利用して図1左に示す実験系を構築し、光の反射に伴う自己ドップラーシフトを超精密測定することにより光の反射に伴う運動量変化の大きさの測定を試みた。当初の計画通り波長 $1\ \mu\text{m}$ 、繰り返し $100\ \text{MHz}$ 、パルスエネルギー $10\ \text{nJ}$ 、 $200\ \text{fs}$ のパルス幅の光源を開発するとともに、安定化された干渉計を構築し、超短パルスの反射に伴う運動量変化を光ビートとしての測定を試みた。結果、自己ドップラーシフトと光周波数コムの縦モードが重畳してしまうことにより、自己ドップラーシフトを単体で抽出することが困難であることが分かった。このため当初の計画を変更し、光により誘起された表面形状変化を精密に測定することにより超短パルスが物質に及ぼす変化を力積の形で測定する実験系を構築した。この実験系は再生増幅器を光源とする $10\ \mu\text{J}$ 程度のフェムト秒パルスにより誘起された表面形状変化を、Mach-Zehnder干渉計により高精度で測定することにより上記目的を実現するものである(図1右)。

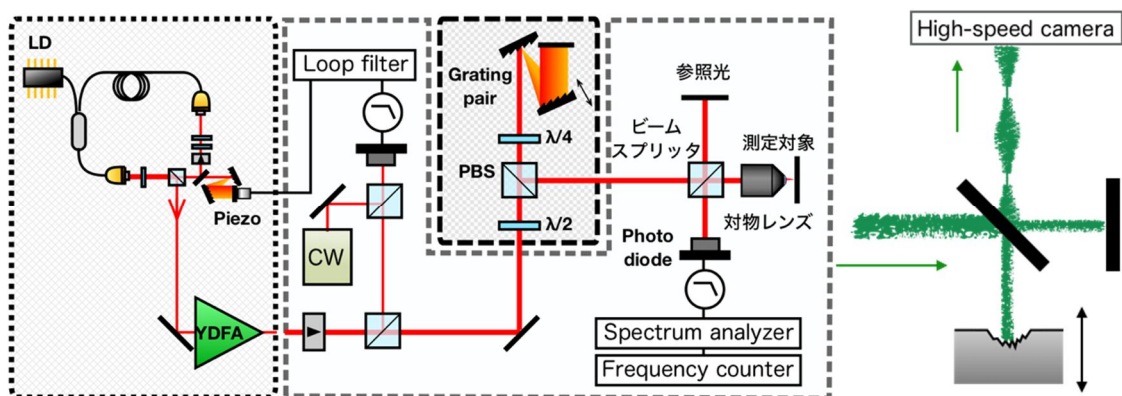


図1:(左)精密光干渉計および光ビートを用いた自己ドップラーシフト測定実験系。

(右) Mach-Zehnder干渉計による光によりもたらされた形状変化の精密測定

4. 研究成果

図2に本研究により開発された、超短パルスレーザー照射前後での表面形状変化の精密測定結果を示す。図は表面粗さ $3\ \text{nm}$ の単結晶シリコンに $8\ \mu\text{J}$ 、 $80\ \text{fs}$ のパルスレーザーを1発照射したときに生じる形状変化を測定したものであり、右に形状変化の断面形状を示す。形状変化測定として $3\ \text{nm}$ 以下の分解能を達成した。パルス1発ごとに生じる形状変化を $10\ \text{nm}$ 以上の精度で測定可能となったのは本研究が初である。また項目3で述べた手法変更の副産物として、鏡面のみならず複雑な形状に対して超短パルスが及ぼす影響の測定が可能となった。この結果、超短パルスにより及ぼされる力積のため、アブレーション深さの数倍におよぶ脆性層が形成されることを見出した。図3にレーザーパルスにより起こる平均的な形状変化の大きさと脆性層の厚さを示す。ともにレーザーフルエンスに対し単調に増加し、アブレーション深さの5-7倍の脆性層が作られることがわかる。これらの結果はApplied Physics A誌に公開されるとともに、光学系として世界最大の展示会が併設されるPhotonics Westにおいて招待講演として発表した。

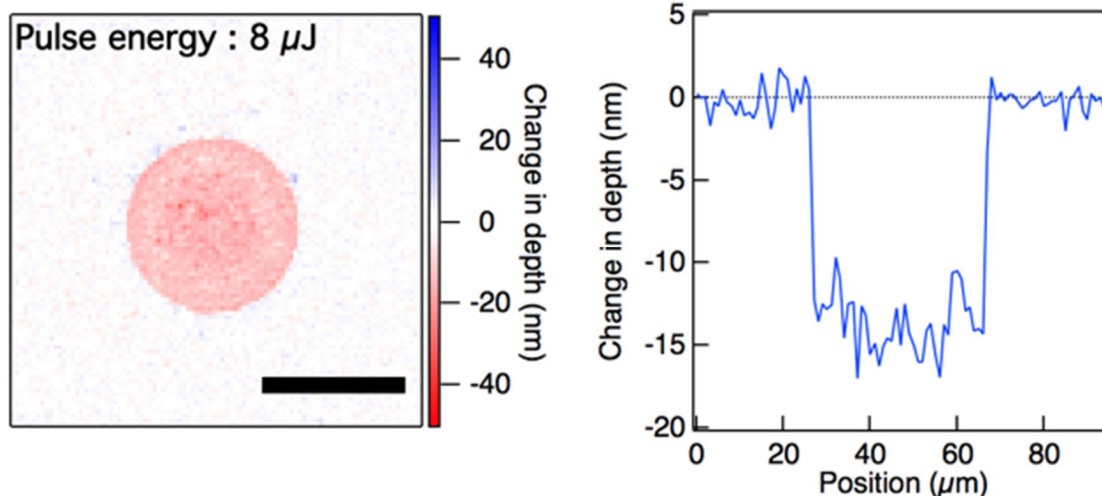


図 2 : (左) 超短パルスにより誘起される 3 次元形状変化. (右) 超短パルスによりもたらされた形状変化の断面図

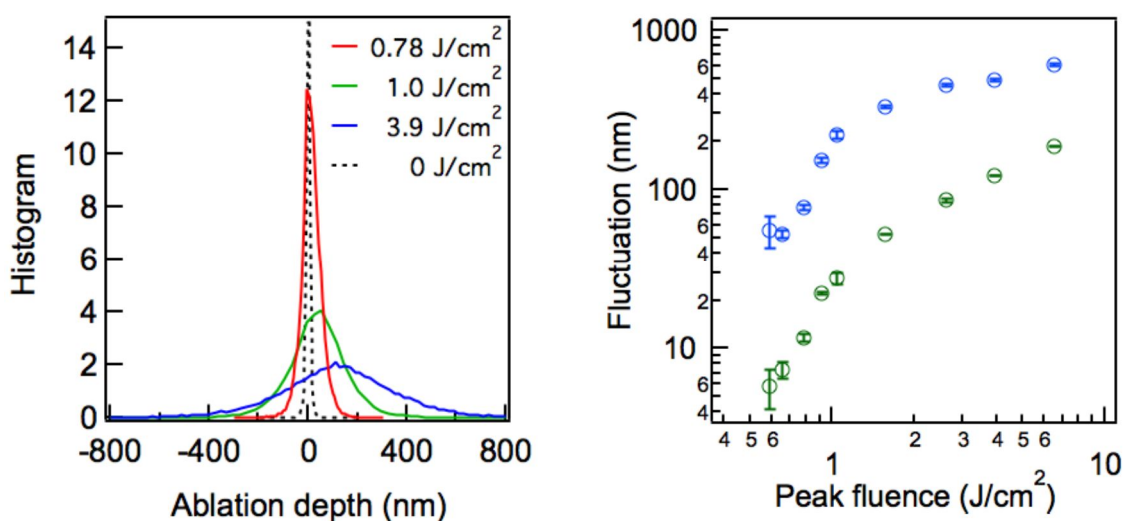


図 3 : (左) 超短パルスにより誘起された形状変化のヒストグラム. 中心位置が形状変化の平均値、幅が超短パルスにより誘起される脆性層の厚さに対応する. (右) 形状変化の平均値と脆性層の厚さのフルーエンス依存性.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Shuntaro Tani, Yohei Kobayashi, “Pulse-by-pulse depth profile measurement of femtosecond laser ablation on copper”, Applied Physics A 124:265 (2018) 【査読あり】 DOI: <https://doi.org/10.1007/s0033>

〔学会発表〕(計 6 件)

1. Shuntaro Tani and Yohei Kobayashi, “Pulse-by-pulse surface structure evolution during multiple-pulse femtosecond laser ablation”, Photonics West 2019 San Francisco, USA(2019) 【招待講演】【国際学会】
2. Shuntaro Tani and Yohei Kobayashi, “Nanometer-Precision Measurement of Surface Morphology Change Induced by Femtosecond Laser Ablation”, 11th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications, Vilnius Lithuania(2018) 【国際学会】
3. 谷峻太郎, 小林洋平, “不可逆系の光物理: 超短パルスレーザー加工の基礎と応用” 第 8 回

光科学異分野横断萌芽研究会(2018) 【招待講演】

〔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：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：該当なし

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：該当なし

ローマ字氏名：

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。