

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656041

研究課題名（和文）

フェムトパルストレインビームを用いたコヒーレント振動制御による原子加工

研究課題名（英文）

A novel fabrication technique based on coherent phonon oscillation by using femto pulse train beam

研究代表者

林 照剛（HAYASHI TERUTAKE）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00334011

研究成果の概要（和文）：フェムト秒レーザーなどの超短パルスレーザーを用いた加工では、レーザーの強い電場により、自由電子の温度が、格子イオン温度よりも十分に高い非平衡状態を経て、レーザー照射後に格子イオンの加熱が始まる。この時、非平衡状態において電子が、原子、分子から直接取り去られる原子の直接加工が実現すると考えられている。本提案では、フェムト秒レーザーを波形成形して数ピコ秒の間に複数のフェムト秒パルスが連結されるパルストレインビーム（1fs=10⁻¹⁵s）を試料表面に照射し、格子振動の光コヒーレント励起を時間分解制御し、原子を直接加工する技術を確認することをめざす。

研究成果の概要（英文）：When a laser pulse interacts with metal or semiconducting target, the lattice oscillation, which has phase coherence and nonlinear electron heating, is excited on their surfaces. We propose a novel femto pulse nano ablation process with oscillation of the coherent phonon. The pulse train, which is excited by femtosecond pulse, is shaped by using spatial light modulator to control the phase of the passing light. And coherent phonon oscillations are enhanced and decayed due to the controlling the shape of pulse train. It enables to accelerate or decelerate the lattice motion efficiently. We suggest femto pulse shaping and its time resolving detection system to challenge that method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	0	1,500,000
2010 年度	1,100,000	0	1,100,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	180,000	3,380,000

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：フェムト秒レーザー，コヒーレントフォノン，パルストレインビーム，レーザー加工

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザーなどの超短パルスレーザーを用いた加工では、レーザーの強い電場によ

り、自由電子の温度が、格子イオン温度よりも十分に高い非平衡状態を経て、レーザー照射後に格子イオンの加熱が始まる。この時、非

平衡状態において電子が、原子、分子から直接取り去られる原子の直接加工が実現すると考えられている。本研究の全体構想では、フェムト秒レーザーを波形成形して数ピコ秒の間に複数のフェムト秒パルスが連結されるパルス列ビーム（ $1fs=10^{-15}s$ ）を試料表面に照射し、格子振動の光コヒーレント励起を時間分解制御し、原子を直接加工する技術を確立することをめざす。

2. 研究の目的

本提案では、原子オーダーの加工を実現するためのパルス列ビームによるレーザー加工技術を新たに提案する。本研究の全体構想では、フェムト秒レーザーを波形成形して数ピコ秒の間に複数のフェムト秒パルスが連結されるパルス列ビームを試料表面に照射し、格子振動の光コヒーレント励起を時間分解制御し、原子を直接加工する技術を確立することをめざす。

3. 研究の方法

本研究では、フェムト秒パルス列ビームによってコヒーレントフォノンを励起し、制御することで非線形な加工を行なうことが可能なレーザー加工システムを開発するため、フェムト秒パルス列を発生・検出するシステムを設計・構築することを目指す。

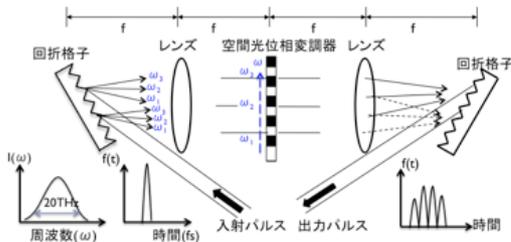


図1 パルス整形光学系

フェムト秒レーザーの波形成形を行うため、図1に示す光学系を構築する。フェムト秒レーザーは、回折格子とレンズによって周波数ごとに分光される。このときパルスは周波数ごとに空間に広がった状態になり、フーリエ変換面に配置された空間光変調器によって周波数ごとに位相変調が行なわれる。そして空間光変調器から出たパルスは、先ほどと逆の配置になったレンズと回折格子の組み合わせによって逆フーリエ変換されて再び空間的に一つのパルスに戻される。このとき、空間

光変調器によって位相変調を受けたパルスはフェムト秒パルス列ビームとなってこの光学系から射出する。

また、フェムト秒パルス列ビーム検出のため、図2に示すフェムト秒パルス列ビーム発生・検出光学系を構築する。レーザー発振器から出たパルスは偏光ビームスプリッターでゲート光とフェムト秒パルス列ビーム整形光へと分割される。

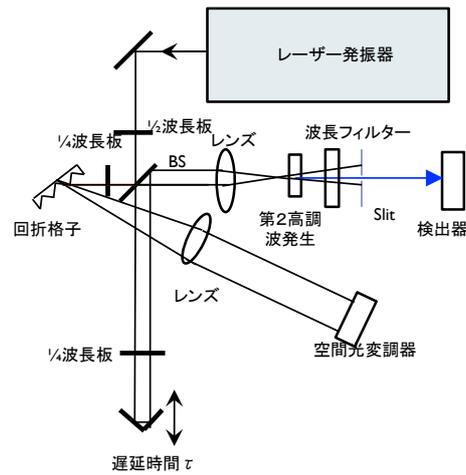


図2 レーザ波形成形検出光学系

4. 研究成果

(1) パルス整形アルゴリズムの開発

フェムト秒パルス列の波形を制御する方法として Simulated Annealing(SA 法)によるアルゴリズム構築を行う。その過程として今回、FFT(Fast Fourier Transform)のプログラム作成を行った。入射光強度を $e_{in}(t)$ とおく。

$$e_m(t) = A_0 \exp(i2\pi\nu t + i\phi) \quad (1)$$

ν は周波数、 ϕ は位相である。FFTでは離散フーリエ変換を行うため、データ周期を T とすると罫目で高周波が発生してしまう。そのため窓関数をかけて高周波成分を抑える。窓関数にはハミング窓 $w(t)$ を用いる。

$$w(t) = 0.54 + 0.46 \cos(\pi t / T) \quad (2)$$

$$f(t) = e_m(t)w(t) \quad (3)$$

(3)式を離散フーリエ変換(8)式に代入してス

ペクトル波形を得る.

$$F(k/nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(nT) \exp(-i2\pi kn/N) \quad (4)$$

$$(k=0,1,2,\dots,N-1)$$

(2) パルス波形整形実験

図2の光学系を用いて、空間光変調器に正弦関数の位相変化を与えて、パルス整形を行ない、フェムトパルス列を発生させることができるか、そしてそれを検出することができるかを検証した。図3に発生したフェムトパルス列を示す。中心に間隔1.3psで幅650fsと800fsの大きなピークが確認できた。また中心から両端に離れていくと大きさにばらつきが見られたがおよそ0.5ps間隔でピークが発生した。以上からフェムトパルス列の発生とその検出が可能であることが確認できた。

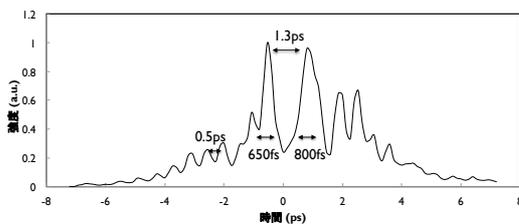


図3 フェムトパルス列整形結果

(2) フェムトパルスレーザ加工基礎実験

パルスの電界強度はエネルギー一定であれば、パルスの時間幅に反比例して大きくなる。そこで時間幅を変化させて照射光の電界強度を変化させて加工形態がどのように変化するか検証した。パルス時間幅を測る方法としてフーリエ変換限界パルスの時間・周波数波形互いに満たす関係式(1)を用いた。

$$\Delta t \cdot \Delta \nu = K \quad (5)$$

Δt はパルス時間幅、 $\Delta \nu$ はスペクトル幅である。この式はパルス光の周波数成分の位相が全て揃っている状態で成り立つ式で K はパルス波形によって変わる係数である。フェムトパルスのガウス型であれば $K=0.441$ となる。実際は分散効果によって位相は揃っていないので、この式は

$$\Delta t \cdot \Delta \nu \geq K \quad (6)$$

となり、スペクトル幅からパルス幅の最小値を求めることができる。

Fig.4 に実験装置を示す。光源は中心波長800nm、繰り返し周波数80MHzのTi:Sapphireレーザを用いた。パルスは1/2波長板と偏光ビームスプリッターによってエネルギーを調整する。対物レンズにはNA0.95、100倍のものを用いて、焦点距離合わせは反射光をCCDカメラで測定することで調節した。

Fig.5 に分光器で測定したパルスのスペクトルを示す。①～⑤の5つの異なるスペクトル幅(半値全幅)のパルスをつくり、(4)式からパルス時間幅を求めた。その結果、80, 72, 69, 61, 58fsの時間幅を持つレーザが得られた。それらのパルスシリコンに照射したときの加工痕のSEM像を図4に示す。加工エネルギーは6mJである。パルス時間幅が80~69fs(①~③)では加工痕周りに溶解物と思われる白い塊が多く見られた。61, 58fs(④, ⑤)ではそのような塊は見られず、加工痕も小さく熱変性の影響が少ない結果となった。このことから照射パルスの時間幅が短くなるにつれて熱変性が起きにくくなることがわかる。

以下に得られた研究成果をまとめる。フェムトパルス列を用いたコヒーレントフォノン制御による非線形レーザ加工システムの開発を目指して、振動モデルの提案および、THzの強電界を利用した振動制御方法の提案を行った。

次に、提案したパルス列ビームによる加工を実現するため、フェムト秒レーザの位相変調を行い、フェムト秒オーダーのビームの時間波形を整形するための位相変調制御アルゴリズムを構築した。

次に、超短パルス光の時間波形を計測するための、フェムト秒時間波形の計測システムを構築し、フェムト秒レーザの時間波形の制御とその時間波形の計測基礎実験を行った結果、構築した装置で、パルス時間波形の制御および計測が可能であることを確認した。

また、使用したレーザにおいて、コヒーレントフォノン励起状態での、レーザ加工が可能であることを確認するため、中心波長800nm、6mJのフェムトパルスによる加工光学系を構築し、レーザ加工基礎実験を行った。照射光のパルス幅を58~80fsに変化させ

て加工痕を調べた結果、62fs以下のパルス幅でコヒーレントフォノン生成に由来する加工痕を確認し、69fs以上では熱拡散の影響があることを確認した。

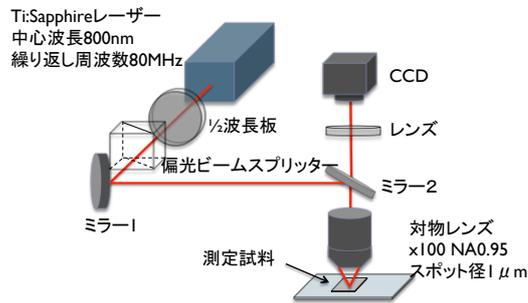


Fig.4 レーザー加工光学系

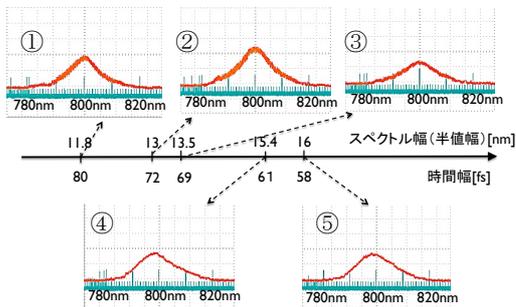


Fig.5 照射光スペクトル幅と時間幅

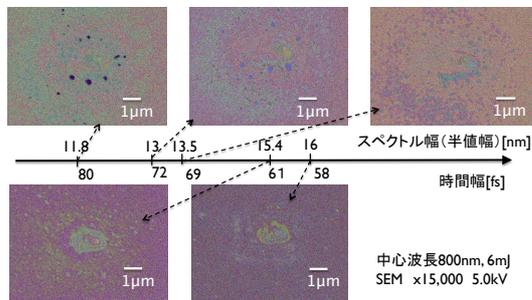


図4 パルス時間幅と加工痕

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0件)

[学会発表] (計2件)

1. Yusuke Fukuta, Terutake Hayashi, Masaki Michihata and Yasuhiro Takaya, Development of a Novel Surface Processing System Using Femtosecond Pulse Train, International Conference on Precision Engineering, 8th-10th Nov. 2012, To be published.,

2. 福田悠介, 林 照剛, 道畑正岐, 高谷裕浩, フェムトパルスストレーンによる表面原子加工システムの開発, 2012年度精密工学会春季大会学術講演会(2012), pp.387-388, 金沢大学, 9月22日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 照剛 (HAYASHI TERUTAKE)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00334011

(2) 研究分担者

高谷 裕浩 (TAKAYA YASUHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70243178

道畑 正岐 (MICHIHATA MASAKI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70588855