

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289017

研究課題名(和文) 時間分解コヒーレントフォノン制御を用いた表面原子のインプロセスナノ加工・計測

研究課題名(英文) In-process nano surface processing control by using time resolved coherent phonon excitation on semiconductor target with

研究代表者

林 照剛 (Hayashi, Terutake)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00334011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、時間的に近接させた2つのフェムト秒パルスビーム(ダブルパルスビーム)を照射した時に、第1のパルス照射後に、ターゲット表面に生じるインコヒーレントなプラズマ励起、格子系のコヒーレント振動励起などの瞬間的な励起現象を低照度レーザー加工に応用することを検討している。本課題では、フェムト秒レーザー照射直後から100ps程度の時間が経過するまでの過渡的なプラズマ励起および格子系の励起現象、また、励起表面の加工中に生じるターゲット表面の形態変化について、時間分解観察を行い、低照度ダブルパルスビームによるレーザー加工現象の基礎過程を調べる。

研究成果の概要(英文)：A novel surface processing method is proposed and investigated the fundamental phenomena for processing the localized incoherent and coherent photo excited field. A novel surface processing method is proposed to process the semiconductor target with stimulation by a pulse train beam, which has several peak within their time duration in a few pico second. After first peak is irradiated, a incoherent plasma or a coherent lattice excitation is instantly stimulated on the target. The author consider a surface processing procedure using the low fluence laser beam to process the photo excited surface. In order to verify the feasibility of the proposed method, we investigate the surface morphology on the semiconductor target when the double pulse beam is irradiated with interval from 10 ps to 100 ps. The time resolved observation of surface morphology is performed to understand the fundamental process for low fluence beam processing on the localized thermally excited surface.

研究分野：光加工，計測

 キーワード：フェムト秒レーザー 表面励起加工 コヒーレントフォノン コヒーレント励起 インコヒーレント励起
アブレーション パルストレイン ダブルパルス

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物質表面に照射すると、その強い電場により、電子-フォノンのカップリングにより発生する自由電子と格子イオンの時間的な位相が揃った格子振動(コヒーレントフォノン)が励起され、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(2温度状態)を経て、レーザー照射後に格子イオンの加熱が始まる。この格子イオンの振動が時間的に一様な状態に保たれる状態では、時間的に一様な振動特性を持つ物理的に非常に均一な被加工面がレーザー照射領域に形成されると考えられる。

本研究では、コヒーレント振動状態にある物質表面にフェムト秒パルスレーザーを照射して、表面加工を行う技術を提案しており、加工表面の励起状態を時間分解制御し、励起面の状態をモニターしながら、加工を行うシステムの開発を行う。また開発したシステムを用いて、コヒーレント振動の時間応答を詳細に調べ、加工量や加工表面特性との関係を明らかにすることにより、フェムト秒レーザー加工過程をより精密に制御する新たな技術を確立することを目指す。

2. 研究の目的

フェムト秒レーザーの高強度電界は、その入射条件が、強度、配置、角度、入射光の波長など、一定の要件を満たすと物質表面で、導電帯の位相が入射光波の位相に揃った共鳴振動である表面プラズモン・ポラリトンや格子イオンの振動位相が揃ったコヒーレントフォノンを励起する。

本研究では、これらのコヒーレント振動の制御を行い、コヒーレント振動の励起面を加工することによって、フェムト秒レーザー加工における加工面の時間的な性質を揃え、加工を行う方法を提案する。

本計画では、コヒーレントフォノンを励起する前に、パルストレーンビームを半導体基板表面に照射した場合に、光励起面がどのような性質を示すかについて調査し、励起面の状態における加工影響について調査する。また、パルストレーンビームによるコヒーレン

トフォノン励起加工システムの設計を行い、コヒーレント振動面の光励起表面加工技術を確立することを目指す。

3. 研究の方法

本計画では、インコヒーレントな光励起とコヒーレントな光励起に、光励起現象を分類し、インコヒーレントな光励起現象について、調査を行う。

半導体基板表面に、レーザーを照射する場合、インコヒーレントな励起と、コヒーレントな励起の効果は、それぞれが重畳することが予想されることから、コヒーレント励起の効果を調査するためには、まず、第一に、インコヒーレント励起の加工影響を詳細に調べて、光励起効果におけるコヒーレント励起効果とインコヒーレント励起効果を峻別する必要がある。

インコヒーレントな励起については、光励起によって、表面に励起される電子密度の変化がもたらす局在熱エネルギー場が挙げられ、本研究では、その励起と減衰の効果を実験的に確認し、また、励起領域の空間的な局在性についての検証を行う。

そのため、パルストレーンビームを最も単純な形で実現したダブルパルスビームを用いた実験を遂行する。具体的には、それぞれが、加工対象半導体基板の損傷閾値以下の照度の励起用の第一パルス、加工用の第2パルスによって、パルストレーンビーム(ダブルパルスビーム)を構成し、2つのパルス間隔を変化させて、基板表面の加工実験を行った。

まず、第一のパルスによる励起効果の減衰について調査するため、アブレーション加工領域の損傷閾値を計測した。この実験では、第2パルスによって、基板表面が加工される場合の損傷閾値がパルスの時間間隔によって変化する量を計測し、第一のパルスの励起効果が時間的に減衰するかを確認している。

また、インコヒーレントな局在熱エネルギー場の空間的な局在性とその領域の時間的な変化を確認するため、ダブルパルスによって加工された基板表面の加工形状を原子間力顕微鏡を用いて計測した。

4. 研究成果

図1に、パルス間隔が1psのダブルパルスビームによって、SiCターゲットを加工した結果を示す。第1パルス、第2パルスともにSiCの損傷閾値である1200mJ/cm²を下回るMax 800mJ/cm²の照度のレーザーで加工を行っており、第1パルス、第2パルスを時間間隔を100ms以上にして複数回照射してもターゲット表面に、加工痕は確認されないが、時間間隔を400ps以下にした場合は、試料表面を加工することができることが確認された。

このことは、第1のパルスが照射後、400psまでの間には、時間的に減衰する表面励起効果が現れていることを意味している。また、レーザー加工の加工領域の断面プロファイルの計測結果から、その領域は空間的には、800mJ/cm²の照射強度のビームにおいては、深さ30nmの範囲に空間的に局在していることが確認できる。

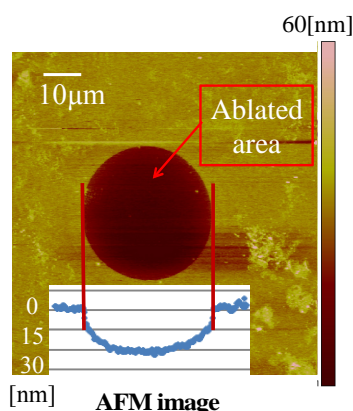


図1 SiCターゲットの加工結果

次に、図2に、ダブルパルスのパルス間隔を変化させて(400fsから100ps)、SiCターゲットの損傷閾値を計測した結果を示す。また、図2のグラフにはあわせて、SiCターゲットをシングルパルス照射し、同じ条件で損傷閾値を計測した結果を青の実線で示している。

ダブルパルスビームによるSiCターゲット加工において、第2パルスによる加工における損傷閾値の計測結果は、全てシングルパルスの加工による損傷閾値を下回り、その差分が第1パルスの励起効果によるものだと考えられる。

図2のグラフにおいて、ターゲットの損傷

閾値が低いことは、第1パルスの励起効果がより高いことを意味している。

インコヒーレントな励起は、加工閾値の40%の低減効果を示すこと、その持続時間が100ps以下となることが確認された。

今後は、半導体基板表面に表面プラズモンやコヒーレントフォノンなどのコヒーレント励起面を形成し、加工することで、上述の実験で確認された励起効果に加えて、新たに現れる励起効果(損傷閾値、加工レート、表面形態)を調べるため、研究を継続する予定である。

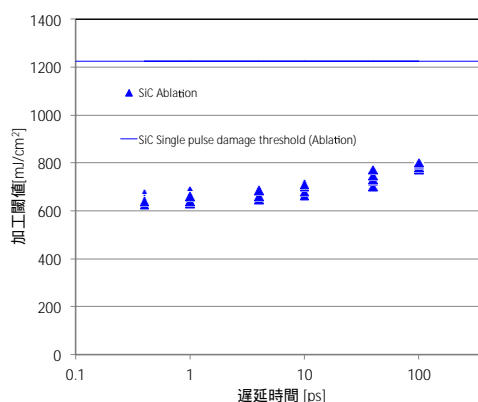


図2 パルス間隔と損傷閾値の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

1. パルストレインビームを用いたコヒーレントフォノン励起加工に関する研究(第一報) - コヒーレントフォノン励起加工システムの構築 - , 林 照剛, 福田悠介, 道畑正岐, 高谷裕浩, (2014), 精密工学会誌, Vol. 80, No.9, pp. 867-872

2. Dynamics of spallation during femtosecond laser ablation studied by time-resolved reflectivity with double pump pulses, Takayuki Kumada, Tomohito Otake, Masaharu Nishikino, Noboru Hasegawa, Terutake Hayashi, Applied Physics Letters, 108, 011102-1-011102-4, 10.1063/1.4939231

[学会発表](計13件)

1. フェムト秒レーザーを用いたダブルパルスビームによる励起状態面の半導体表面加工に関する研究, 横尾 英昭, 林 照剛, 松永 啓伍, 王成武, 松川洋二, 黒河 周平,

日本機械学会九州支部 第 69 期総会講演会
2. フェムト秒レーザーを用いた半導体ウェハ表面のコヒーレントフォノン励起加工に関する研究(第 3 報)-表面励起効果の検討-, 林 照剛, 横尾 英昭, 松永 啓伍, 松川洋二, 王成武, 黒河 周平, 2016 年度精密工学会春期全国大会,
3. フェムト秒レーザー励起を用いた表面ナノ加工に関する研究, 林 照剛, 横尾 英昭, 黒河 周平, 松永 啓伍, 王成武, 松川洋二, 2016 年度日本機械学会生産システム部門研究発表講演会
4. ダブルパルスビームを用いた時間分解表面励起加工に関する研究, 林 照剛, 横尾 英昭, 松永 啓伍, 王成武, 松川洋二, 黒河 周平, 2015 年度電気加工学会全国大会,
5. フェムト秒レーザーを用いたダブルパルスビームによる表面励起現象を利用した表面加工に関する研究, 横尾 英昭, 松永 啓伍, 林 照剛, 王成武, 黒河 周平, 松川洋二, 2015 年度精密工学会九州支部 飯塚地方講演会
6. フェムト秒レーザーを用いた半導体表面励起加工に関する研究, 林 照剛, 横尾英昭, 王成武, 松川洋二, 黒河 周平, 国内, 学会, 日本機械学会 2015 年度年次大会
7. フェムト秒レーザーを用いたダブルパルス照射による励起状態面の表面加工に関する研究, 横尾英昭, 林 照剛, 王成武, 松川洋二, 黒河 周平, 精密工学会秋期全国大会,
8. フェムト秒レーザーを用いた半導体ウェハ表面のコヒーレントフォノン励起加工に関する研究(第 2 報)-加工エネルギー閾値の検討-, 林 照剛, 横尾英昭, 王成武, 松川洋二, 黒河 周平, 精密工学会秋期全国大会
9. フェムト秒レーザーを用いた半導体ウェハ表面のコヒーレントフォノン励起加工に関する研究, 林 照剛, 黒河 周平, 国内, 学会, 精密工学会春期全国大会
10. フェムト秒レーザーを用いた半導体ウェハ表面のコヒーレントフォノン励起加工に関する研究, 林 照剛, 横尾英昭, 王成武, 松川 洋二, 黒河 周平, 国内, 学会, 精密工学会春期全国大会,
11. Surface Processing Using a Femtosecond

Pulse Train Beam, Terutake Hayashi, The 15th International Conference on Precision Engineering (2014)

12. フェムトパルストレインによるコヒーレントフォノン励起加工に関する研究(第三報) -テラヘルツ帯域でのエネルギー伝達機構の検討-, 林 照剛, 大島玄喜, 道畑正岐, 高谷裕浩 2014 年度精密工学会学術講演会春期大会講演論文集, (2014)

13. フェムトパルストレインによるコヒーレントフォノン励起加工に関する研究(第 1 報) コヒーレントフォノンの時間分解計測システムの開発, 大菊 崇弘, 林 照剛, 道畑 正岐, 高谷 裕浩, 2013 年度精密工学会学術講演会秋期大会講演論文集, (2013)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: レーザー加工装置

発明者: 林照剛, 黒河周平

権利者: 九州大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2015-170450

出願年月日: 2015 年 09 月

国内外の別: 国内

名称: レーザー加工装置、レーザー加工方法、及び加工物の製造方法

発明者: 林 照剛, 高谷裕浩, 道畑正岐

権利者: 大阪大学

種類: 特許出願

番号: 特願 2013-165921

出願年月日: 2013 年 08 月

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 照剛 (Hayashi Terutake)

九州大学 工学研究院

准教授

研究者番号: 00334011

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし