

**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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630028

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局在熱エネルギー場の光励起加工技術の開発

研究課題名(英文) Surface processing method with localized surface excitation for thermal energy field using femto pulse train beam

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数のパルスのピークを時間的に近接させたパルストレイン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瞬間的な光励起現象を低照度レーザー加工を実現することを目指している。本課題では、フェムト秒レーザー照射直後10psから100ps程度の時間に生じる格子系の励起現象が形成されたターゲット表面に光パルスを照射して加工した時の加工形態の変化について、時間分解観察を行い、その加工基礎過程を調べる。

研究成果の概要(英文)：A novel surface processing method is proposed and investigated for the localized heat energy field on 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 plasma or a 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 thermal 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 低照度光 局在熱エネルギー場 パルストレインビーム

## 1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザーを半導体材料の表面に照射すると、その高強度電界によって、電子が励起され、さらに、光子と電子の相互作用における応答時間、電子と格子イオンの相互作用の応答時間の差によって、電子温度が格子温度より高い非平衡状態(2 温度状態)を経て、その後、電子と格子イオンの再結合などのプロセスを経て、温度は等しくなり時間と共に減衰していく。

ここで、電子と格子イオンの相互作用が始まるまでの時間のオーダーでは、電子励起のエネルギーは、光照射領域に閉じ込められ、また、その時間のオーダーでは、励起電子の拡散領域が小さな領域に限定される。従って、強い電界強度のレーザーを照射すると、時間的に短い時間、空間的に小さな表面領域に高いエネルギーを持つ電子が閉じ込められた局在熱エネルギー場が形成されると考えられる。

本提案では、フェムトパルス照射によって半導体表面が励起されているわずかな時間に存在するこの局在熱エネルギー場を低照度レーザーによって加工する新たなレーザー加工技術を開発することに挑戦する。

この局在熱エネルギー場は、半導体などの材料では、パルス照射から  $p\ s$  ( $ps=10^{-12}s$ ) のオーダーでしか観測できないため、繰り返し周期が  $10ns$  ( $ns=10^{-9}s$ ) のパルスレーザー(繰り返し周波数が  $100MHz$ ) では、その加工を行うことは困難である。

研究代表者は、これまで数ピコ秒の間に複数のフェムト秒パルスが連結したパルストレーンビームを試料表面に照射し、レーザー加工を行う技術の開発に取り組んでおり、本研究では、光励起によって瞬間的に現れる過渡的な熱エネルギーの局在領域を時間的に近接した複数のピークを持つパルストレーンビームで加工する方法の確立に取り組む。

## 2. 研究の目的

本研究では、フェムト秒レーザーパルスを試料に照射すると、その高強度電場により、時間的に、また空間的に局在する熱エネルギー場において、フェムトパルスと局在エネル

ギー場の相互的な高速応答を利用して、高速かつ高精度な局所レーザー加工を実現する技術を確立することを目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、フェムトパルスによって瞬間的に励起された領域の空間的な局在性と、その光吸収応答の高速性に着目し、その領域を高速、かつ高精度に加工する技術を提案している。

本計画では、フェムトパルストレーンビームによる局在熱エネルギー場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、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  $1200mJ/cm^2$  を下回る  $Max\ 800mJ/cm^2$  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と確認された。

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、 $800\text{mJ}/\text{cm}^2$ 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。

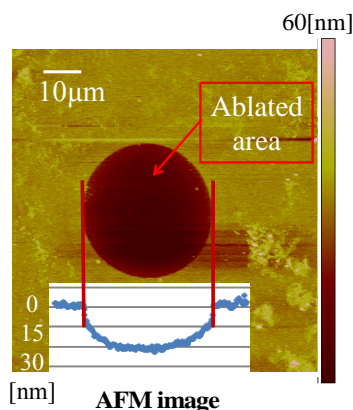


図1 SiCターゲットの加工結果

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。従って、第一パルス照射後、その励起効果は、1ps以降、パルス間隔の増加とともに失われていくこと、1psまでの時間範囲では、その励起効果はほとんど失われないことが確認できる。

以上の実験結果から、パルストレーンビームによる加工を行うことによって、時間的にまた空間的に局在する光エネルギーによる

励起場を、半導体基板表面に形成し、その領域を精密に加工できる可能性を示唆した。

今後は得られた知見を基に、詳細な励起メカニズム、加工メカニズムについて検証を行い、パルストレーンビームによる光励起場の精密加工技術の確立を目指した研究を継続して遂行する予定である。

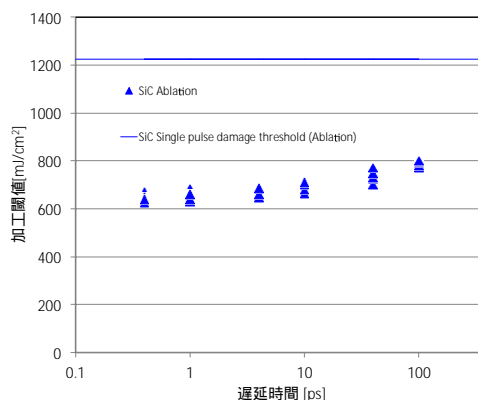


図2 パルス間隔と損傷閾値の関係

## 5. 主な発表論文等

(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1件)

1. 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11件)

- 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
- 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、
- 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, 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, 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)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 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: 特願

番号: 2015-170450

出願年月日: 2015 年 09 月

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

## 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