

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	短パルスレーザー時空間プロファイル変調技術の開発とレーザー微細除去・積層加工プロセス高度化への応用
Title(English)	Development of temporal and spatial laser beam shaper for applications of advanced laser subtractive/additive processing
著者(和文)	キム ビョンギ
Author(English)	Byunggi Kim
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10464号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:伏信 一慶,佐藤 勲,花村 克悟,齊藤 卓志,平田 敦
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10464号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	機械制御システム	専攻	申請学位（専攻分野）： 博士 Academic Degree Requested	（ 工学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	Kim Byunggi		指導教員（主）： Academic Advisor(main)	伏信 一慶
			指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

近年、短パルス・超短パルス光源の普及に伴い、レーザを用いた微細加工プロセス分野が急速に発展している。レーザビームと材料の相互作用を理解した上で、適切な光学素子を用いることで様々な応用技術が提案できる。本研究では、主にナノ秒パルスレーザを用いた微細加工プロセスの高度化に向けて、光学素子の開発とレーザアブレーション現象の解明という 2 つの観点からアプローチし、複数の研究課題を遂行した。第 1 章「緒論」と第 6 章「結論」を除き、第 2 章から第 5 章にそれぞれの研究課題の内容について述べた。

第 2 章「液体光学素子を用いた時空間ビームシェイパー」では、液体の熱レンズ効果を用いた液体光学素子の応用に関する要素技術について検討を行った。まず、CW レーザ励起液体光学素子における自然対流の発生とその解析手法について示した。CFD とビーム伝搬法をカップリングした数値モデルを用いて光学パラメータの影響について検討を行った結果、励起光と検出光の焦点位置と光軸位置を適切に調整することによって自然対流の影響を最小化しつつ高度なアニュラービームが生成できることが示された。また、ナノ秒パルスレーザ励起液体光学素子における密度波の発生を用いて、非定常焦点制御素子の原理を数値的に示した。

第 3 章「TCO 薄膜のナノ秒パルスレーザスクライビングの高度化」では、ナノ秒パルスレーザを用いた微細加工プロセスの代表例の一つである太陽光パネルスクライビングの一種である TCO 薄膜の除去プロセスの高度化を睨んだ実験・理論的な検証を行った。まず、TCO 薄膜のように光学浸透長さが膜厚より大きい場合の薄膜除去メカニズムについて実験的な検討を行った結果、加工結果に対する照射方向の影響は TCO 表面におけるプラズマ遮蔽から起因することが明らかになった。この知見を用いて、ベッセルビームを用いた加工システムを提案した。ベッセルビームは回折限界を超えた集光が可能であるため幅 $2.3 \mu\text{m}$ と非常に精密なスクライビングが可能となり、極めて長い焦点深度を持つことから光軸方向のサンプル位置決めロバスト性が向上された。さらに、ベッセルビームの自己再構築を用いることでプラズマ遮蔽の影響を抑えながらより深いアブレーションレートが得られることを実験・理論的に示した。この結果により透明薄膜のナノ秒パルスレーザプロセスにおけるベッセルビームの応用可能性が示された。

第 4 章「単結晶 4H-SiC のレーザ除去加工メカニズムの解明」では、次世代半導体基板材料として注目を浴びている単結晶 4H-SiC の穴あけ加工(Through substrate via; TSV)のメカニズムを実験的に調べた。波長・ビームプロファイル・加工雰囲気等の影響を調査した結果、多パルスを用いる場合 SiC の表面が融点に達する前に炭化し、高吸収係数の DLC 層が形成され、しきい値よりも小さいフルエンスで加工されることが分かった。そのため、ベッセルビームを用いる場合には高次サイドローブによるアブレーションが顕著となり、波面が基板の深くまで伝搬しなくなるため高アスペクト比を持つ穴あけ加工は不可能であった。また、光学浸透長さが大きい波長の場合はシリコンメルトの再凝固層の影響でクラックの発生が促進し、穴あけ深さが大きくなることが分かった。最後には、4H-SiC のアブレーションメカニズムを取りまとめた上で、穴あけ加工のためのベッセル・ガウシアンダブルパルス加工法を提案した。

第 5 章「エバネッセントベッセル光発生素子の開発」では、高価な対物レンズが不要なアキシコンレンズベースの独自のエバネッセントベッセル光発生素子の作動特性とその応用について述べた。アキシコンレンズベースの光学系であるため非常に廉価で光学系構成のロバスト性が高いことを示した。また、応用技術として Sub- μm オーダの樹脂硬化を取り上げ、実験的な調査を行った。その結果、厚み方向に 310 nm 、幅 $3 \mu\text{m}$ の非常に微細な硬化物を作成することが可能であった。このように、今後この光学素子を用いた様々な微細加工プロセスの提案ができると考えられる。

本研究を通して短パルスレーザアブレーションのメカニズムが実験および解析的に調べられ、レーザビームの特性と材料の応答を同時に考慮した新たな解析法とモデリング手法が提案された。今後、様々な材料に対する革新的なレーザプロセスの提案に資する知見が得られたと考えられる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	機械制御システム	専攻	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested	（ 工学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	Kim Byunggi		指導教員(主)： Academic Advisor(main)	伏信 一慶
			指導教員(副)： Academic Advisor(sub)	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This study aims at improving quality and versatility of nanosecond laser microfabrication by investigating mechanism of several materials processing and suggesting novel beam shapers. Excluding the first and sixth chapter which describes “introduction” and “conclusion”, the specific research works are separately reported in the four chapters.

In the chapter 2, operation characteristics of the beam shaper using the fluidic optical device were investigated. Experimental and numerical study was conducted to suppress effect of natural convection on beam propagation. In addition, principle of temporal focus control using nanosecond laser induced fluidic optical device was demonstrated by numerical simulation.

In the chapter 3, experimental and theoretical studies on nanosecond laser scribing of TCO thin film are given. Bessel beam was used to improve resolution of the processing and ablation rate by using its special propagation property. Theoretical model, in which beam propagation and heat equation are coupled, was applied to explain mechanism of experimental achievement.

In the chapter 4, mechanism of the drilling process of single crystalline 4H-SiC was investigated for through substrate vias (TSV). Effects of various optical parameters such as beam profile (Bessel or Gaussian), wavelength (532 nm or 1064 nm) and environment (ambient air or water) were experimentally studied using microscopy and Raman spectroscopy. Key findings indicate that carbonization and silicon re-solidification had critical impact on quality and structure of the crater fabricated by multiple pulses. Based on the knowledge obtained in this study, novel processing method using double pulse of Bessel and Gaussian beam is suggested.

In the chapter 5, the axicons-based optical device for generation of evanescent Bessel wave is introduced. This “object lens free” optical device was used for additive manufacturing of photo-sensitive resin, and sub-micrometer resolution was experimentally confirmed.

Through this study, various experimental method and analytical model was demonstrated to understand and improve short-pulsed laser processing. I expect that those will contribute to development of original processing method of various materials in the future.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).