

フェムト秒レーザー誘起コヒーレント散乱場
によるナノプロセッシング

2013 年度

小 原 豪

学位論文 博士（工学）

フェムト秒レーザー誘起コヒーレント散乱場
によるナノプロセッシング

2013 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

小原 豪

主 論 文 要 旨

報告番号	甲 第	号	氏 名	小原 豪
主論文題目： フェムト秒レーザー誘起コヒーレント散乱場によるナノプロセッシング				
(内容の要旨) ナノプロセッシング技術は電子・光デバイス等の高集積化・高機能化とともに近年発展してきた。その中で、ナノスケールの周期構造を施した表面は従来にはない新規な特性を示すので、光学分野、医療分野、機械分野等への応用が期待されている。現在では サブ波長構造を大面積に作製するナノプロセッシング技術の革新が希求されており、フェムト秒(fs)レーザーを使った新しいナノプロセッシング技術が注目されている。fs レーザを用いた周期構造作製技術は大気中でのドライ・アブレーション加工であり、電子デバイス用のナノプロセッシング技術と比較して、簡単に周期構造を多種類の基板上に作製できる特徴を備えている。本論文では fs レーザ誘起散乱近接場を用いたナノホールアレー作製手法、並びに散乱遠方場を用いたレーザー誘起表面微細周期構造作製の2つの手法を研究した。 単一金ナノ微粒子周囲に発生する近接場光は照射光の回折限界以下の領域に局在する。2次元配列した金微粒子系では、隣接微粒子間で近接場の結合が生じ、金微粒子配列をテンプレートとした2次元ナノホールアレーを作製することが困難であった。そこで、本論文の著者は加工基板背面から光照射する新しい方式を提案し、2次元配列微粒子下部に高い光強度を維持し2次元ナノホール加工を可能にする光強度分布が得られることを理論的に示した。 一方、散乱遠方場由来のリップル構造作製プロセスも最近注目されている。fs レーザ誘起リップル構造(Laser Induced Periodic Surface Structure)は単一ビームを基板表面に多パルス照射するだけで自発的に作製できる周期構造である。レーザーフルエンスに依存してリップル構造が異なる。その中で、照射波長程度の周期を持つ Low Spatial Frequency LIPSS (LSFL)は、表面のランダムな粗さに起因する散乱光で自発的に作製されるため、リップル構造に歪みがあり、表面光素子に応用することが困難であった。そこで、入射光に近共鳴するナノ散乱体をレーザー照射前に配置することで散乱遠方場パターンを制御し、所望の周期構造がデザインできることを示した。さらにレーザー波長の概ね1/4以下の周期構造(High Spatial Frequency LIPSS, HSFL)の作製メカニズムは解明されていなかった。そこで本研究では、HSFL 作製実験と、Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法により散乱構造体が存在する系の光強度分布を計算し、HSFL の作製メカニズムを明らかにした。本論文は6章からなる。 第1章は序論で、ナノテクノロジーの歴史的背景を先ず述べ、ナノ周期構造の新しい機能とその産業応用について述べている。最後に本研究の目的と意義を述べている。 第2章は、fs レーザ誘起散乱場ナノアブレーションプロセッシングの物理について詳述している。近接場と遠方場散乱について Mie 散乱理論を用いて説明した。更に FDTD 法を用いて Maxwell の方程式を解くことで光強度分布を求める過程について概説した。 第3章は、金微粒子の2次元アレー配置を用いた近接場ナノ加工技術について述べる。従来の上方からのレーザー照射ではなく、加工基板後方からレーザー照射することで、隣接微粒子との表面プラズモン結合を抑制し、ナノホールアレーが作製できる光強度分布が得られることを示した。 第4章は、人工ナノ散乱体を基板表面に照射前に設置することで散乱遠方場を制御し、fs レーザ誘起表面周期構造を設計・制御する技術について述べている。金ナノ構造や誘電体ナノ構造を配置すると、散乱遠方場を制御でき、ナノアブレーションパターンニングに使える任意の光強度分布パターンを生成できることを示した。 第5章は、HSFL の作製メカニズムについて述べている。fs レーザ光損傷閾値以下のフルエンス照射後、HSFL は照射レーザースポット内にランダムに点在した。FDTD 法による光強度分布解析により、Mie 散乱由来の散乱遠方場と照射レーザーとの干渉場で HSFL が成長することを明らかにした。 第6章は本研究の結論である。本研究により得られた成果を総括し、今後の展望について述べている。				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	First name Surname Go Obara
<p>Title</p> <p>Nanoprocessing by coherent scattered field excited by femtosecond laser</p>		
<p>Abstract</p> <p>Nanoprocessing by coherent scattered light excited by femtosecond (fs) laser is attractive because it can be done in air and it is easily applicable to advanced industrial manufactures. This study focuses on the enhanced near-field processing and far-field processing using scattered field light induced by fs laser. As for the near-field nanoprocessing, it is technically difficult to fabricate nanostructures on the surface by a conventional forward laser irradiation to the substrate because gold nanoparticles easily form double-layered particle arrays. By using a new backward irradiation scheme, a localized enhanced near-field under the particle is obtained on a large substrate surface. Concerning the small periodic ripple structure formation by interference of the scattered far-field and incident laser, the ripple formation mechanism has not been elucidated before. The mechanism for ripple formation process is proposed. This dissertation consists of six chapters.</p> <p>Chapter 1 is an introduction. The historical background of nanotechnology research, and novel applications and innovative functions of periodic surface nanostructures are presented.</p> <p>Chapter 2 explains basic physics of surface nanoprocessing by coherent scattered field excited by fs laser pulses.</p> <p>Chapter 3 describes the theoretical results of enhanced near-field processing of 2D-arrayed nanoholes on Si substrate. By using a new backward irradiation of 800-nm fs laser onto the substrate on which two layers of hexagonally-packed gold nanoparticles as plasmonic scatterers, the near-field coupling between the neighbors is decreased while the near-field under the individual gold particle on the substrate is enhanced for near-field light nanoprocessing.</p> <p>Chapter 4 presents experimental and theoretical results on plasmonic control of far-field interference for regular ripple formation on semiconductor and metal. Experimental observation of interference ripple pattern on Si substrate irradiated by fs laser is presented. Gold nanosphere is found to be the origin for ripple formation. Ripple patterns of optical field intensity are theoretically controllable by depositing desired plasmonic and Mie scattering far-field pattern generators. The plasmonic far-field generation is demonstrated not only by metallic nanostructures but also by the controlled surface structures like ridge and trench structures on various material substrates.</p> <p>Chapter 5 describes experimentally and theoretically the evolution of High Spacial Frequency LIPSS (HSFL) fabricated on SiC crystal surfaces by irradiation with fs laser pulses in a vacuum chamber. It is elucidated experimentally and theoretically that Mie scattering from the surface defect is a cause for growing the HSFL. Surface defects were induced after the multipulse irradiation of fs laser. This is attributed to the fact that Mie scattering is dominant when the electron number density in SiC is low so that HSFL is predominantly fabricated. These experimental results are well explained by 3D Finite-Difference Time-Domain (FDTD) simulation.</p> <p>Chapter 6 is the conclusions of this dissertation. It also presents future prospects of this study.</p>		