

氏名(本籍地)	鳥居 周一 (東京都)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第 6822 号
学位授与年月日	平成26年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	レーザープラズマ軟 X 線によるアブレーション

主査	筑波大学教授	博士(工学) 佐々木正洋
副査	筑波大学教授	理学博士 秋本 克洋
副査	筑波大学准教授	博士(理学) 牧村 哲也
副査	産業技術総合研究所総括研究主幹	博士(工学) 新納 弘之

論 文 の 要 旨

本研究ではレーザープラズマ軟 X 線によるアブレーションについて実験的研究を行った。レーザープラズマは、固体ターゲットにナノ秒パルスレーザー光を集光照射することにより発生させた。このプラズマから輻射される、波長が 10 nm 前後の軟 X 線を集光した。この集光には、用いる波長領域で効率よく集光できるように開発した光学系を用いた。これによりナノ秒パルス高いパワー密度軟 X 線を実現した。集光した軟 X 線をシリカガラス (アモルファス SiO_2)、ポリメチルメタクリレート(PMMA)、ポリジメチルシロキサン (PDMS) に照射し、表面を剥がし取る軟 X 線アブレーションについて研究した。

これら 3 つの物質では、1 ショットあたりのアブレーション深さ D が $D=1/\alpha \ln (P/P_{th})$ の関係になることを見出した。ここで、 P は入射した軟 X 線のパワー密度であり、ある閾値 P_{th} を越えるとアブレーションに至る。また、 α は軟 X 線と物質との相互作用係数である。軟 X 線が物質内部で Δx の深さだけ伝搬すると $\Delta P = -\alpha P \Delta x$ だけ軟 X 線のエネルギーが物質に伝達される。これによりアブレーションに至るといふ相互作用の形態を仮定すると、実験的に得られた D と P の関係が説明できる。

シリカガラスの場合、 α は光吸収係数 α_{abs} に比べて 1 桁高いことを明らかにした。この結果は、シリカガラス表面近傍で、効率的なアブレーションが起きていることを意味している。また、アブレーションによって放出される正イオンは、24 eV までの運動エネルギーを有していることを明らかにした。これは熱的な蒸発粒子に比べて 2 桁高い。さらに正イオンはほぼ原子状態に分解されていることを明らかにした。これらの結果から、以下のアブレーションメカニズムを提案する。軟 X 線がシリカガラスに入射すると、光吸収長の領域で、結合が切断される。さらに、この領域のうち表面近傍では、電子放出によって正孔が蓄積される。この正孔間では、静電エネルギーが入射光子数に対して非線形に蓄えられる。これにより表面近傍の正孔間でクーロン反発力が働き、高い運動エネルギーを持って、表面から放出される。このアブレーションは、パルス幅内の短い時間ごとに表面から順に深い領域に向かって進行する。これまでに、軟 X 線

アブレーションにより、アスペクト比が1、幅が50 nm のナノレンチを精密に作製できている。ナノ秒のパルス軟 X 線が照射される間、軟 X 線のエネルギーがシリカガラスに蓄積され続けると、その結果発生した熱は100 nm 程度拡散する。その場合、その熱拡散長よりも微細な構造は熔融により失われてしまうことになる。しかし、ここで提案するメカニズムによりアブレーションが起きるとすると、表面の各深さの領域は、パルス幅より短い時間で表面から剥ぎ取られることになる。これにより、50 nm のレンチが作製できることを整合性良く説明できる。

PMMA と PDMS の場合、相互作用係数は光吸収係数とほぼ一致することが分かった。閾値では、吸収した軟 X 線のエネルギー密度は、それぞれの物質を原子状に分解するのに必要なエネルギーの密度と比較して、1桁程度小さい。このことから、モノマーの程度にまで分解して放出されていると考えられる。また、軟 X 線照射により PMMA および PDMS に数マイクロスケールでの高アスペクト加工を実現した。さらに、軟 X 線照射表面の化学構造は変化しないことが明らかとなった。これらの結果は、微細加工を行う上で重要な結果である。

以上の研究により、ナノ秒高パワー密度軟 X 線をシリカガラスに照射すると、効率的なアブレーションが起きることを見出した。これは、軟 X 線照射により表面に蓄積していく正孔間の斥力によるクーロン爆発により説明できる。また、PDMS、PMMA の場合には、化学的改質が起きないアブレーションを実現した。これらの軟 X 線アブレーションは、高品位なマイクロ・ナノ加工に有用な特性を有していると言える。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本学位論文では、ナノ秒高パワー密度の軟 X 線によるシリカガラス、PDMS、PMMA のアブレーションについて研究を行った。従来、アブレーション閾値を越える光照射によるアブレーションは、専ら赤外から紫外の領域で発振するレーザーを用いて実現されてきた。ナノ秒パルスレーザーを用いたアブレーション加工においては、パルス幅内での熱の蓄積により熔融するため、微細な構造は10マイクロメートルの程度が限度であった。また、フェムト秒レーザーを用いた場合は、10ピコ秒程度で格子系へのエネルギー変換が起き、応力波が誘起される。これにより、加工解像度が制限されていた。本研究は、ナノ秒軟 X 線領域の光によるアブレーションの研究と位置付けることができる。それを実現するために、高いパワー密度で軟 X 線を照射するための光源、光学系を開発した。これにより、シリカガラス、PDMS、PMMA ともに熱熔融による制限を受けないアブレーション過程を見出した。さらに、PDMS、PMMA では、軟 X 線照射前後で化学的改質が生じないことを見出した。このように、微細加工に有用な特性を見出した点が評価できる。また、シリカガラスの場合には詳細にアブレーションメカニズムについて研究を行った。これにより、従来の赤外から紫外領域のナノ秒レーザーによるアブレーションと比較し、軟 X 線アブレーションに特有な効率が高いエネルギー伝達プロセスが支配的であることを見出した。さらに、このアブレーションを矛盾無く説明できるクーロン爆発モデルを提案した。これらの研究により、光アブレーションの整理および理解が進んだ点およびナノ秒軟 X 線アブレーションがマイクロ・ナノ加工において優れた特性を有することを見出した点が評価できる。

〔最終試験結果〕

平成26年2月17日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。