

超短パルス軟X線レーザー特有の表面加工メカニズムを解明

ーナノスケールの超精密・直接加工が可能に！ー

量子科学技術研究開発機構 DINH THANH HUNG 主任研究員、石野雅彦主幹研究員、錦野将元グループリーダー、宇都宮大学、東京大学、早稲田大学、東北大学、理化学研究所、高輝度光科学研究センター(JASRI)らの研究グループは、X線自由電子レーザー「SACLA」を用いて超短パルス軟X線レーザーに特有の表面加工メカニズムを解明しました。

現在、ナノメートルスケールの半導体造形技術は複雑な工程からなるリソグラフィプロセスによって実現されています。将来の量産化や低価格化を実現するためには、より単純な直接加工プロセスを用いた精密加工技術による高い量産性と品質の実現が鍵となります。従来用いられている赤外領域（波長：800～1000 nm 程度）に比べて波長の短い極端紫外（EUV）～軟X線領域（波長：10～200 nm 程度）の超短パルスレーザーを用いると、波長と同等の超精密加工が可能になると期待されています。また、パルス幅が数十～数百フェムト秒である超短パルスレーザーを用いることで、加工領域以外への熱的影響を抑制した非熱的加工が実現可能となります。

今後、さまざまな材料を用いた超短パルス軟X線レーザーによる加工データの蓄積と検証を積み重ねることで、レーザー加工学理の解明が進み、高集積回路やナノ構造をもつ機能性材料の量産化につながると期待されます。

なお、この成果の詳細は Nature Research が提供するオープンアクセス・ジャーナル“Communications Physics” に 2019 年 1 月 28 日にオンライン掲載されます。

一般的に光や粒子などのビームを材料に照射して加工した際には、図 1 に示すように照射ビームと直接相互作用する「第一次相互作用領域」と、その領域からエネルギーが熱的影響として拡散してきた「第二次相互作用領域」が発生します。周辺の第二次相互作用領域では、熱的影響により加工部周辺の変質や開口外縁部の盛り上がり（リム）、そしてひび割れ（クラック）といった熱の影響による意図しない構造が発生し、加工の精度を悪化させます。

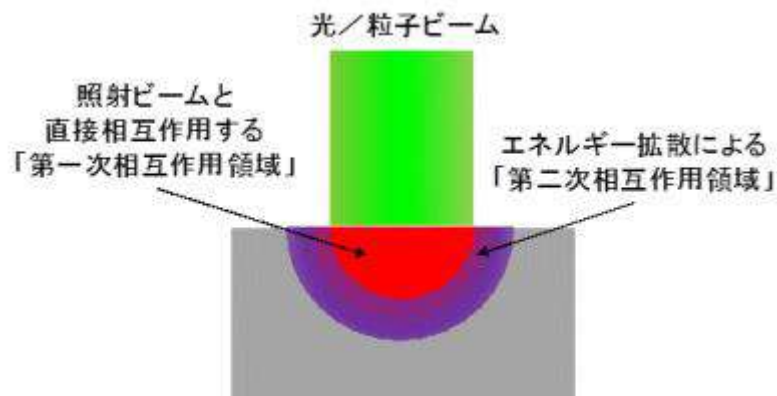


図1：X線エネルギーが吸収されて相互作用する領域の模式図

本研究では SACLA を用いて、シリコンに対する吸収特性が大きく変わる 2つの波長（光子エネルギー）、10.3 nm(120 eV)と 13.5 nm(92 eV)の超短パルス軟X線レーザー照射試験を行い、軟X線の吸収の違いによる表面加工形状について、原子間力顕微鏡（AFM）を用いた詳細な解析を行いました。その結果、軟X線の吸収が小さい波長（13.5 nm）を用いた場合、熱的影響による熔融プロセスが顕著となり、図 2(a)のように表面形状において中央部の膨張や盛り上がったリム構造形成が見られました。一方、吸収が大きい波長（10.3 nm）を用いた場合では、レーザー照射条件を適切に選択することにより、図 2(b)のように数 nm スケールの深さ形状を持つ熱的影響が抑制された加工を実現できることがわかりました。

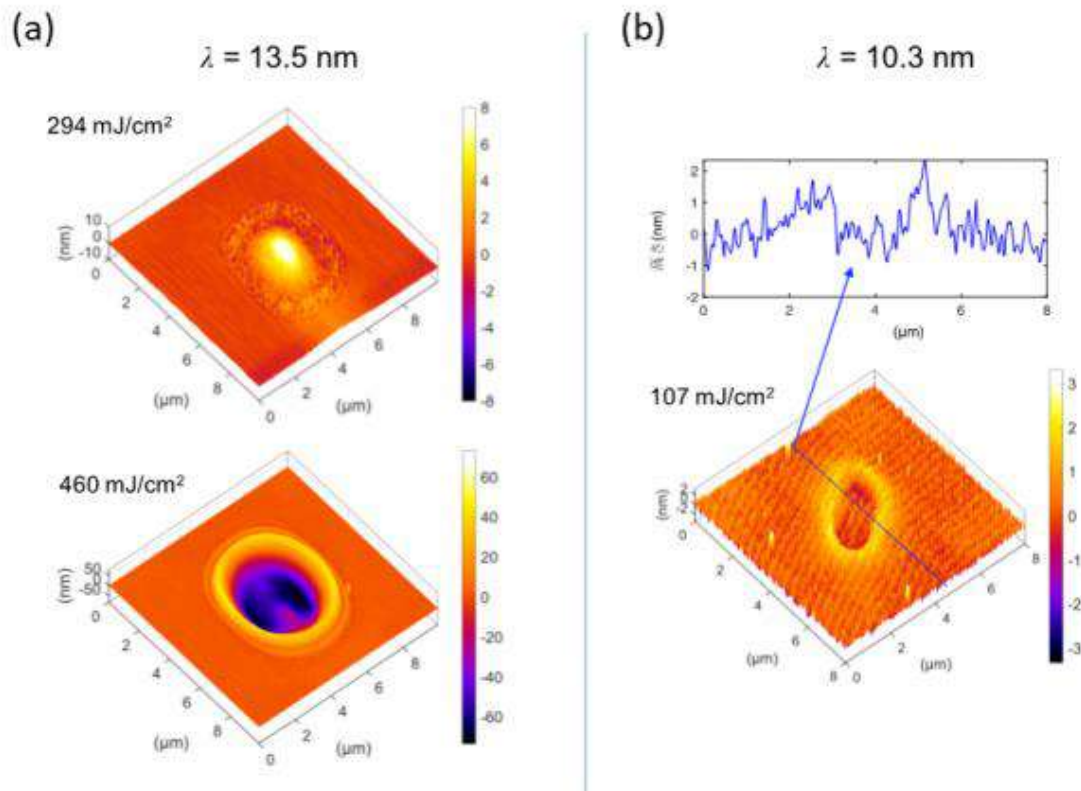


図 2：超短パルス軟 X 線レーザー照射後のシリコン表面の様子（AFM による測定）
 (a)波長 13.5nm (92eV) の軟 X 線レーザー照射による加工痕。(b)波長 10.3nm (120eV) の軟 X 線レーザーの最適照射によるナノスケールの加工痕

軟 X 線の吸収による原子と電子の振る舞いを組み込んだ理論モデル計算（XTANT コー）と実験を比較した結果、シリコン表面に加工痕が発生する最小のレーザー照射強度（加工しきい値）が、図 3 の実線及び点線が示す理論モデルで示す非熱的加工しきい値から熱的加工しきい値までの計算結果とよく一致することを明らかにしました。これらの結果は、加工材料や加工サイズに応じて超短パルス軟 X 線レーザーの波長や照射強度を適切に選択することで、さまざまな材料に非熱的な超精密加工が実現できる可能性を示しています。

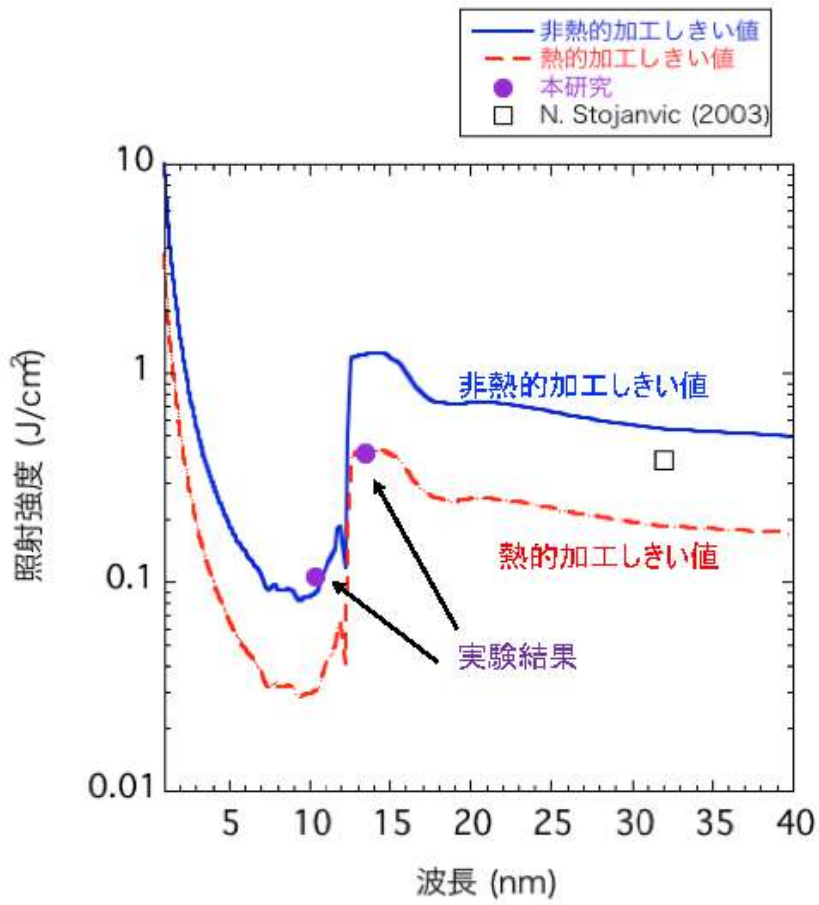


図 3 : 加工しきい値の理論モデル（実線）と実験結果（紫色）との比較

日文新闻发布全文 <https://www.qst.go.jp/site/press/35558.html>

文：JST 客观日本编辑部翻译整理