

ダブルパルス紫外レーザーを用いた非熱的超微細加工システム構築

Construction of non-thermal ultra-fine processing using double-pulse UV lasers

草場 光博 (Kusaba Mitsuhiro)

1. はじめに

現在、IoT/AI による超スマート社会に向けた高性能かつ精密な電子デバイス開発が行われており、同時にレーザー加工技術もより精密な超微細加工の確立とそれによる半導体材料の濡れ性付与が要求されている。半導体材料への濡れ性付与は、材料の機械的衝撃や熱による物理化学的性質を損なわず、容易に微小領域の加工ができる方法の開発が必要不可欠である。そこで今までに解明してきたナノ秒紫外レーザーによる半導体材料表面への非熱的超微細加工の結果を基に、超解像顕微鏡で利用されているコヒーレント相互作用技術を利用し、2 台のナノ秒紫外レーザー（エキシマレーザー）を組み合わせた超微細加工システムを構築し、従来のレーザー加工では達成できていない回折限界を超えた 10 nm 程度の超微細加工を目指す。2022 年度は現有の XeCl エキシマレーザー（発振波長 308 nm）加工システムに 2 台目のレーザーとして KrF エキシマレーザー（発振波長 248 nm）を組み込むために KrF エキシマレーザーを用いたレーザー加工システムの光学系の設計・製作を行った。また、ナノ周期構造形成の機構の解明のため電磁粒子シミュレーションコードを用い、周期構造のレーザー強度依存性および構造形成の時間変化について解析した。

2. KrF エキシマレーザーを用いた加工システム構築

図 1 に今回構築した加工システムの光学配置図を示す。レーザー光源として、発振波長 248 nm、パルス幅 20 ns、繰り返し周波数 10 Hz の KrF エキシマレーザー（COMPex102, Lambda Physik）を用いた。レーザーフルエンスは 2 個の偏光プリズムで構成されたエネルギー減衰器でエネルギーを変化させることで調整し、 $f = 120 \text{ mm}$ のレンズでターゲット表面に集光した。照射位置でのレーザー強度分布をガウス形状になるように調整し、その直径

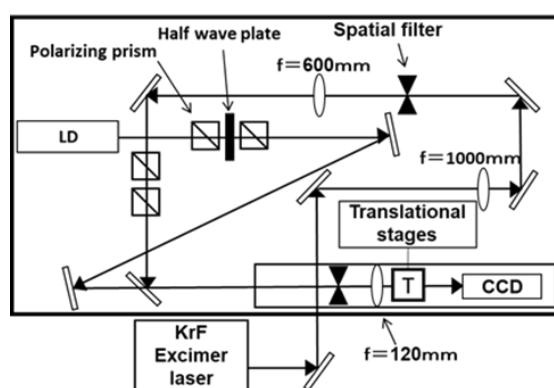


図 1 KrF エキシマレーザー加工システムの光学配置図

は水平方向が $136 \mu\text{m}$ 、垂直方向が $101 \mu\text{m}$ であった。ターゲット材料は $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ の Al 板を用いた。Al 表面の加工痕の直径（加工径）はレーザー顕微鏡（OLS4500, Olympus）で測定した。図 2 に照射レーザーフルエンスに対する加工径をプロットした

ものを示す。黒丸は測定データである。加工径が 0 になるレーザーフルエンス（融解閾値）が約 0.93 J/cm^2 であることを測定することができた。

3. ナノ周期構造形成の機構の解明

ナノ周期構造の形成に対して、レーザーアブレーション過程で材料表面に生成したプラズマとレーザーとの相互作用が重要な役割をもつと仮定して、核融合科学研究所の坂上教授が開発された 2 次元電磁粒子コードを用いてナノ周期構造の形成について調べた。図 3 にシミュレーションに用いたフェムト秒レーザー照射の様子を示す。シミュレーション条件は、プラズマとして水素プラズマ ($T_e = 10 \text{ keV}$, $T_i = 0.1 \text{ keV}$) とし、陽子と電子の質量比 (M_i/M_e) を 114.75 とした。ターゲットプラズマは密度が臨界密度 n_c の 10 倍で厚さ $10 \mu\text{m}$ 、幅 $8 \mu\text{m}$ とし、その手前にアブレーションで生成されるプリプラズマを模擬して臨界密度の 0.1 倍で厚さ $2 \mu\text{m}$ 、幅 $8 \mu\text{m}$ とした。このプラズマにレーザー波長 800 nm のフェムト秒レーザーを入射させた。レーザー強度を 1×10^{15} から $5 \times 10^{16} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2)$ まで変化させたときのナノ周期構造について解析した。その結果、図 4 に示すようにレーザー強度が $1 \times 10^{15} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2)$ では、ナノ周期構造の形成が見られなかったが、 2×10^{15} から $5 \times 10^{16} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2)$ においては周期間隔が平均 320 nm のナノ周期構造が形成されることが分かった。さらにナノ構造形成の時間変化について解析したところ、レーザー照射開始から 500 fs までは時間経過とともに周期間隔が長くなっていくことが分かった。

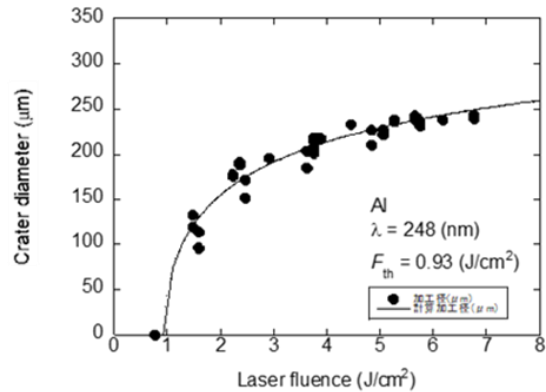


図 2 Al の加工径のレーザーフルエンス依存性

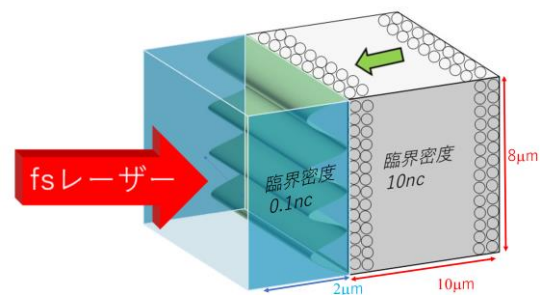


図 3 シミュレーションに用いたフェムト秒レーザー照射の様子

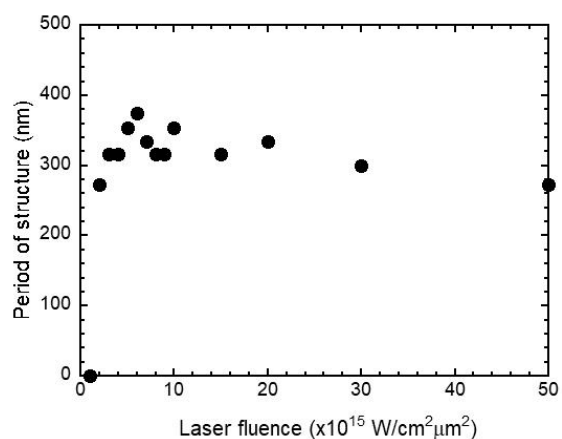


図 4 周期構造の周期間隔のレーザー強度依存性