



解説

3. 高出力レーザープラズマ研究の新しい展開
3.4 レーザープラズマ工学 (環境・宇宙・産業) 応用

フェムト秒レーザー加工

藤田雅之, 橋田昌樹*

(財)レーザー技術総合研究所

Femtosecond-Laser Processing

FUJITA Masayuki and HASHIDA Masaki*

Institute for Laser Technology, Suita, 565-0871, Japan

(Received 25 October 2004 / Revised 6 December 2004)

Recently, the femtosecond lasers have become an important tool in various research fields. The main features of the femtosecond laser pulses are ultra-fastness and the ultra-high electric field. It is expected that their capabilities to induce nonlinearities in the laser-matter interactions will lead to the development of innovative technologies in the fields of laser material processing. In the femtosecond-laser ablation experiments, several unique features such as clear ablation thresholds, reproducible and predictable ablation profiles, periodical nano-structure formation, had been observed. These phenomena are useful for the micro-machining in sub-wavelength scale. Also x-ray emission from the femtosecond-laser irradiated metal can be applicable for contamination analysis. The debris generated in the femtosecond-laser ablation in the air was found to be in the form of nano-particle. Non-thermal process in the ultrafast laser-matter interaction has a possibility to realize a phase control of semiconductors.

Keywords:

ablation, femtosecond laser, laser processing

1. はじめに

1980年代後半から、極短光パルス発生とその増幅に関する技術が急速に発展した。現在では、パルス幅はフェムト (10^{-15}) 秒の領域からアト (10^{-18}) 秒の領域に向かい、パルスのピーク強度は、テラ (10^{12}) ワットからペタ (10^{15}) ワットの領域に到達している [1, 2]。今やテーブルトップサイズでテラワット級の高強度フェムト秒レーザーパルスにより超高強度電界が作り出せ、ターンキーオペレーションのフェムト秒レーザーが容易に入手できるため、フェムト秒レーザーパルスの極限特性を活かした研究、産業応用が様々な分野で進展している [3-6]。

フェムト秒レーザーの特徴は、超高速性と超高強度電界とである。例えばエネルギー 300 μ J、パルス幅 100 fs のフェムト秒パルスレーザーを直径 20 μ m にまで集光すると、レーザー光強度は 10^{15} W/cm² になる。パルス幅が 10 ns (ナノ 10^{-9} 秒) のレーザーで同様の高強度を得るためには、30 J のエネルギーを必要とする。真空中での光の電場の振幅 E [V/m] は光強度 I [W/cm²] により

$$E = 2.74 \times 10^3 \sqrt{I} \quad (1)$$

と表される。 10^{15} W/cm² のレーザー強度は 8.6×10^{10} V/m に相当する。絶縁体や半導体にこのような高強度レーザーを照射すると、多光子吸収過程 (アバランシェ過程よりも

支配的) により価電子帯にある電子が伝導帯へ遷移し、伝導電子が増え金属と同じような振る舞いをすると考えられる。

Fig. 1 に短パルスレーザーの応用を産業利用の観点からまとめてみた。パルス幅が 1 ピコ (10^{-12}) 秒を下回ると、レーザーと物質との相互作用において非線形性が顕著になり、多光子吸収を利用したプロセッシングや熱的影響が無視

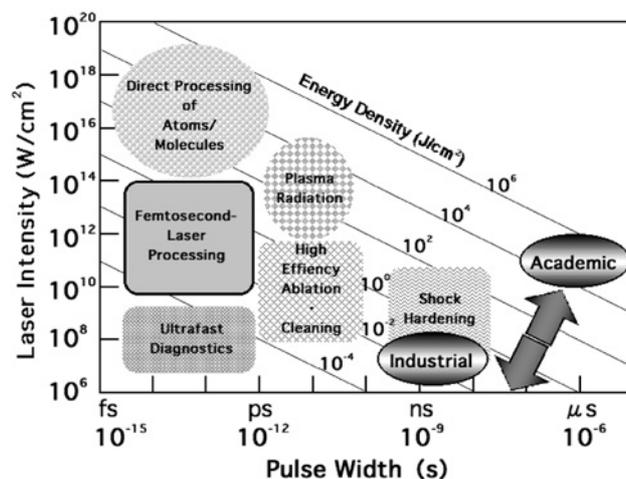


Fig. 1 Industrial applications of the short pulse lasers.

corresponding author's e-mail: mfujita@ile.osaka-u.ac.jp

*current address: Institute for Chemical Research, Kyoto University

できる。この領域、即ちパルス幅が1ピコ秒以下のパルスレーザーを用いた加工が一般的にフェムト秒加工と呼ばれている。一方、パルスあたりのエネルギーを増やしピーク強度を向上させるとレーザーの電界により原子・分子から電子を直接はぎ取ること（直接加工）が可能となる。学問的にも興味深い現象が目白押しとなる。一方、パルスエネルギーが低い場合は、超高速性やスペクトルの広帯域性を利用した新たな計測技術が開発されつつある。

ここでは、フェムト秒レーザーを用いることにより特徴的に現れる金属の加工現象について紹介する。初期のフェムト秒アブレーション研究は文献[7]に詳細にレビューされている。

2. レーザーと物質との相互作用

2.1 エネルギー緩和

レーザーと物質との相互作用は、ピコ秒の時間スケールを境に熱的過程、非熱的過程の領域に区分される。境界となる時間スケールは自由電子から格子イオンへの衝突緩和時間 (τ_{e-p}) により決まるもので対象物質、加熱温度により異なる。衝突緩和時間は電子-フォノンカップリングパラメータ[8]から計算され、金属の場合、数ピコ秒程度[9]と報告されている。衝突緩和時間よりも長いパルス幅のレーザーが物質に照射された場合、電子と格子イオンは平衡状態にありとも同じ温度経過を示し熱的過程となる。一方、衝突緩和時間よりも短いパルス幅のレーザーでは、電子温度が格子イオン温度よりも十分に高い非平衡状態（2温度状態）を経て、レーザーが照射された後に格子イオンの加熱が始まる非熱的過程となる。Fig.2には銅をターゲットとして衝突緩和時間より短い10 psのパルスレーザーを照射した時の表面電子温度と格子イオン温度の時間経過[9]の様子を示す。一般に金属にとって短パルスとは、衝突緩和時間よりも短いパルス幅のレーザーをいう。参考文献[5]には電子-フォノンカップリングパラメータが実験的に調べられている金属元素について、衝突緩和時間と

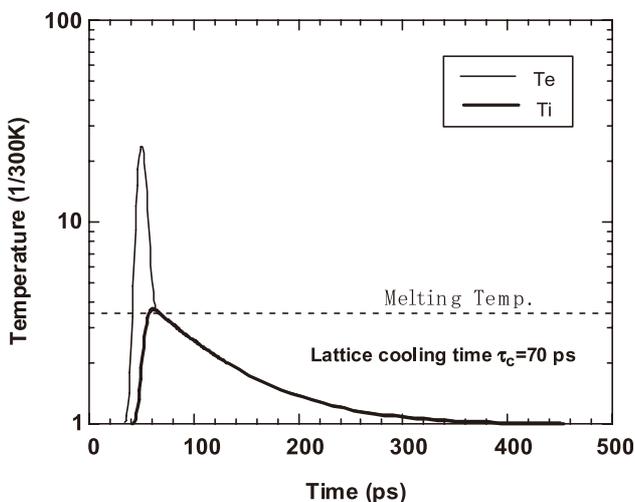


Fig. 2 Estimated temporal evolution of surface electron temperature and lattice ion temperature for copper targets irradiated by a short pulse laser which pulse width is less than 10 ps.

物理定数がまとめられている。衝突緩和時間 t_{e-p} は、格子イオン温度 T_i を融点 T_m まで加熱したときのもので次式から計算できる。

$$\tau_{e-p} = C'_e T_e / \gamma \quad (2)$$

$$T_e^2 = 2C_i / C'_e (T_m - T_0) \quad (3)$$

式(2), (3)に示した記号はそれぞれ、 C_i [$\text{Jcm}^{-3}\text{K}^{-1}$] は格子イオンの熱容量、 T_m [K] は融点、 T_0 [K] はレーザー照射前の格子イオン温度、 T_e [K] は電子の加熱温度、 γ [$\text{Wcm}^{-3}\text{K}^{-1}$] は電子-フォノンカップリングパラメータ、 C'_e [$\text{Jcm}^{-3}\text{K}^{-2}$] は電子比熱を示す。電子温度がフェルミ温度以上になると上式では評価できなくなるので注意しなければならない。

2.2 熱拡散

フェムト秒レーザー加工の特徴は熱拡散長を低減できる点にある。フェムト秒レーザーパルスを試料表面に照射した時、熱拡散長 x_D は電子温度の冷却時間を考慮[10]して次式で表される。

$$x_D = \left\{ \frac{128}{\pi} \right\}^{\frac{1}{8}} \left\{ \frac{k_0^2 C_i}{T_i \gamma^2 C_e} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

ここに、 k_0 [$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$] は熱伝導率、 T_i [K] は格子イオンの加熱温度を示す。例えば、銅を融点付近 ($T_i = T_m = 1,356$ K) までフェムト秒レーザーで加熱すると $x_D = 329$ nm になる。一方、パルス幅が10 nsのレーザーによる加熱では、パルス照射中の熱拡散が無視できず熱拡散長は $x_{th} = 1.5$ mm となりフェムト秒レーザーの場合より数桁長くなる。この拡散長 x_{th} は、レーザーパルス幅を t_p として $x_{th} = (2k_0 t_p / C_i)^{0.5}$ の関係で表される。このことから、フェムト秒レーザーは熱影響部を最小限にできるため微細加工で有力なツールとして利用されている。

2.3 アブレーションレート

フェムト秒レーザー加工のもう一つの特徴は、レーザーとプラズマが相互作用する時間がほとんどない点にある。フェムト秒レーザーパルスにより試料表面が加熱された時、プラズマ（電子とイオンの中性気体）が発生するのに要する時間は数ピコ秒であるため、プラズマが表面に発生したときにはレーザーパルスは終了していることとなる。このような考察から、フェムト秒レーザーを用いたときのアブレーションレートに関して以下の簡単なモデルが提案されている[11]。

レーザー光を物質に照射した場合、吸収係数を α とすると物質内部でのレーザー強度の減衰は侵入深さ z に対して、

$$I(z) = I \exp(-\alpha z) \quad (5)$$

で表される。時間的に矩形なパルス进行を仮定すると、単位質量当たり吸収されたエネルギー E_m は

$$E_m(z) \approx I(z) t_p \alpha / \rho \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 ρ は物質の質量密度である。 E_m が蒸発に必要な（単位質量あたりの）エネルギー Ω を超え

ると蒸発が起り、加熱部が除去され“アブレーション”にいたる。アブレーションの閾値強度を I_{th} [W/cm²], 閾値フルーエンスを F_{th} [J/cm²] とすると,

$$I \geq I_{th} \exp(\alpha z), \quad I_{th} \approx \frac{\rho \Omega}{\alpha t_p}, \quad F_{th} \approx \frac{\rho \Omega}{\alpha} \quad (7)$$

がアブレーション加工の条件となる。この時、パルスあたりのアブレーション率 L_a は、 $z = L_a$ とおいて

$$L_a \approx \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I}{I_{th}}\right) \quad (8)$$

となる。さらに、多光子吸収を考慮した時のモデルは参考文献[5]に紹介されている。

3. フェムト秒加工の特徴

最も人々を魅了したのは熱変性領域が無視できる加工が実証された点であろう[12]。その一例を Fig. 3 に示す。Fig. 3 (a) はナノ秒パルス (10 ns) によるチタンへの穴開けの例である。加工部周辺に熔融領域が見られ再凝固した飛散物が周囲に付着している。一方、Fig. 3 (b) は同じチタンターゲットにフェムト秒パルス (100 fs) を用いて穴開け加工した例である。エッジが鋭く熔融領域がほとんど無視できる加工が実現できている。

切断・穴開け等のレーザー加工現象は基本的に、レーザーエネルギーを物質に吸収させ、熔融・蒸発させることにより達成されている。したがって、レーザー照射領域を少なくとも融点以上に加熱しなければ加工は起きない。同様のことはフェムト秒加工でも起こりうるが、フェムト秒加工の場合はレーザー強度 (W/cm²) が高い (即ち、電界強度が高い) ため、興味深い加工特性を示すことが見出されている。以下に著者らの研究の中で見いだされた特徴的な加工現象を紹介する。

3.1 閾値加工

レーザー加工特性を表すために、横軸を照射フルーエンス (J/cm²), 縦軸をアブレーションレートにしたグラフがよく用いられている。離散的な実験データから正確な閾値を求めることは不可能であるので、プロット点を外挿して加工閾値が求められてきた。このようにして求められた加工閾値のパルス幅依存性から、レーザーパルス幅が 1 ps 以下で加工閾値の依存性が変化することが見出され、その後のフェムト秒加工現象の研究展開につながった[13-19]。

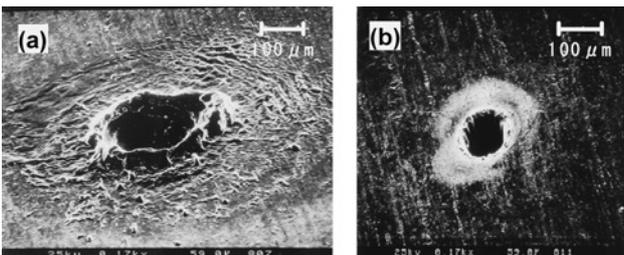


Fig. 3 Comparison of laser-bored holes on Ti targets irradiated (a) by nanosecond laser pulses and (b) by femtosecond laser pulses.

仏 Saclely 研究所の Hashida らは、フェムト秒アブレーションレートの照射フルーエンス依存性を測定し、6 桁にも及ぶアブレーションレートの変化を実験的に明らかにした[20, 21]。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は銅をターゲットとした時のフェムト秒レーザーアブレーション特性を両対数表示したグラフである。従来は、片対数表示のグラフからデータを直線近似し閾値を求めていた。しかし、Fig. 4 に示すように両対数表示することにより、実験データから閾値 (アブレーションレートが急激に変化する点) は照射フルーエンスの変化とともに 3ヶ所現れることがわかった。注目すべきは 2 番目の閾値であり、照射フルーエンスの数%の変化が 1 桁以上のアブレーションレートの変化につながる。

このような閾値近傍のフルーエンスで試料を照射することにより微細加工が可能となり、我々は閾値加工と呼んでいる。Fig. 5 にシャープなエッジを持たせた穴開け加工例を示す。用いたターゲットは鉄、パルス幅は 70 fs である。

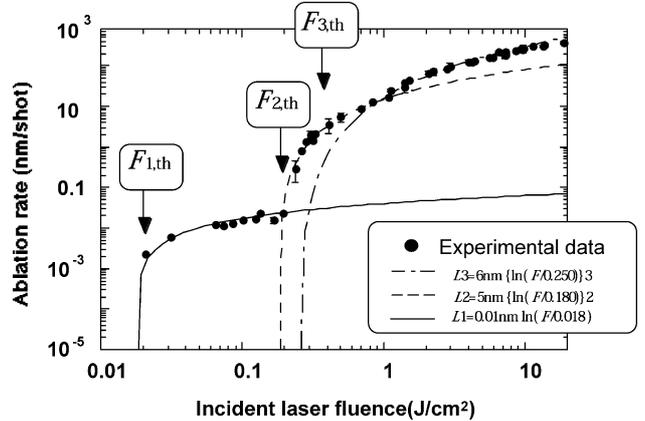


Fig. 4 Experimental results of ablation rate as a function of laser fluence for copper targets irradiated by femtosecond laser pulses.

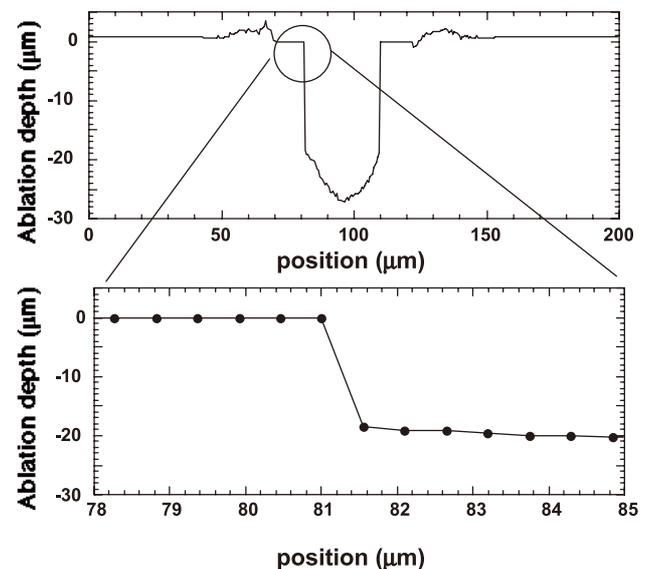


Fig. 5 Cross section of a hole drilled by femtosecond laser pulses.

アブレーションレートが急激に変化する閾値近傍でレーザー光強度分布を制御することで達成された。

Fig. 4において、実線、破線、一点鎖線は近似曲線であり

$$L = \alpha^{-1} [\ln(F/F_{th})]^n \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 L はアブレーションレート、 α は光の吸収係数、 F はレーザーフルーエンス、 F_{th} は実験的に求められるアブレーション閾値、 n は整数である。このような複数の閾値と近似曲線との良い一致は他の金属（鉄、ニッケル、アルミ、モリブデン、鉛、金）でも観測されている[22]。

別の閾値加工の例として Fig. 6 に毛髪の穴開け加工の写真を示す。この時の照射スポットサイズは直径 100 μm であるが、加工穴の直径は約 20 μm である。毛髪は金属と比較して熱変性が起きやすいが、穴周囲の僅かな部分を除けば、毛髪表面には組織の変化は見られない。

また、最も小さい閾値を用いれば、波長よりも十分短いサブミクロンスケールの加工が可能となる。Fig. 7 に金ターゲットへの穴開け加工の写真を示す。用いたレーザーのパルス幅は 100 fs、波長は 800 nm、照射スポット径は約 100 μm である。照射フルーエンスを制御することで波長よりも小さな直径 580 nm の穴を間隔 600 nm で複数個開けることに成功している。

3.2 コントラブルアブレーション[22, 23]

熱影響の少ないフェムト秒加工においては、レーザー光強度分布が忠実に加工形状に反映されることが実験的に確

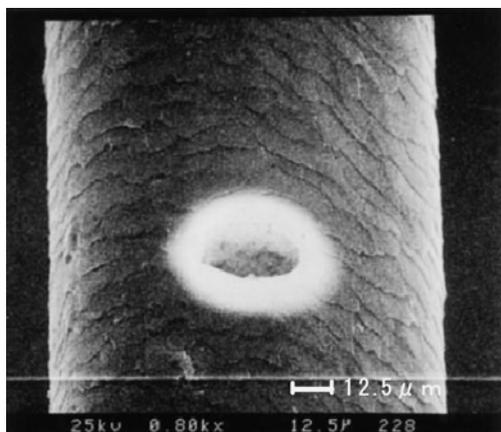


Fig. 6 SEM image of human hair drilled by femtosecond laser pulses.

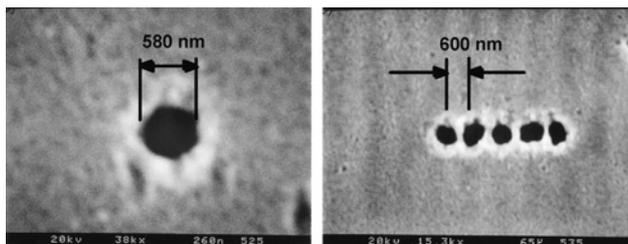


Fig. 7 SEM images of gold targets irradiated by femtosecond laser pulses. The hole diameters are smaller than the laser wavelength (800 nm).

認されている。Fig. 4 のデータは照射レーザーの空間的ピーク強度に対して加工痕の最も深い部分でのアブレーションレート（ショット数で平均した値）をプロットしたグラフであるが、実はレーザー照射スポット内の任意の位置に対して加工痕の形状から得られるアブレーションレート (Fig. 8 参照) も Fig. 4 のデータと良く一致する。ピーク強度に対して得られたデータ (Fig. 4) を○印で、強度分布に対して得られた連続的なデータを実線で Fig. 9 に示す。このことから、レーザー強度分布を正確に把握し加工クレーター形状を数個観測することにより、Fig. 4 のようなフェムト秒加工特性のデータを容易に得られることがわかる。このようなデータが一度得られると、加工形状が予測可能となる。Fig. 10 に Fig. 4 のデータベースから予測される加工形状と実験で得られた加工痕形状との比較を示す。加工形状の予測には Fig. 4 から得られたフィッティング関数を用いている。このような一致が実験的に確認されたことにより、レーザー光強度分布を制御することで所望の加工形状の実現が可能となる。

3.3 ナノ周期構造形成

Birnbaum は1965年、ルビーレーザーによる半導体のダ

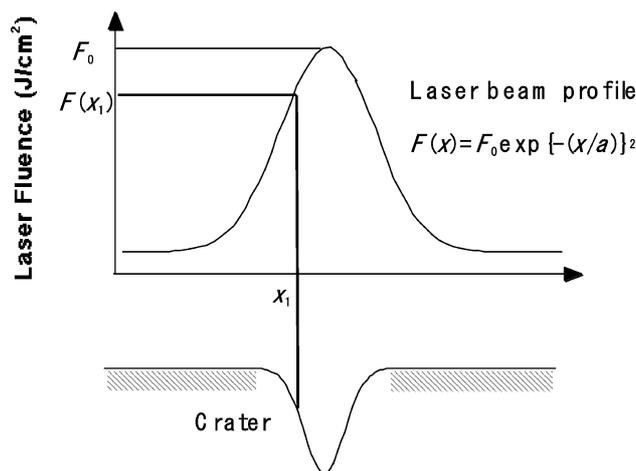


Fig. 8 Focused laser intensity profile (a) and corresponding crater profile (b).

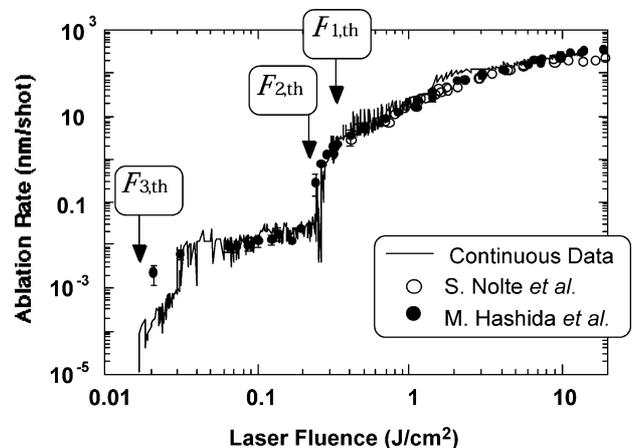


Fig. 9 Comparison of ablation rate shown in Fig. 4 and continuous data obtained by crater profiles as a function of local laser fluences as shown in Fig. 8.

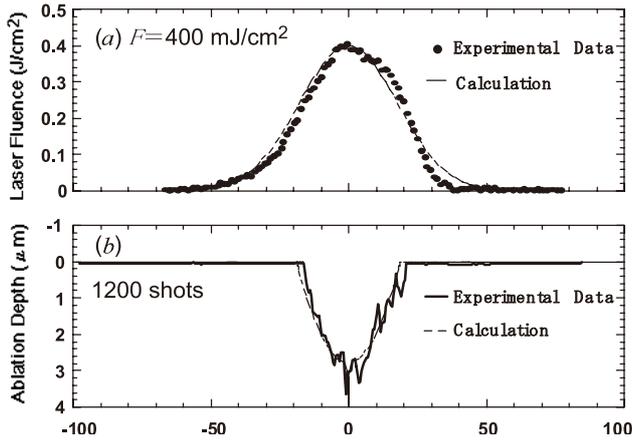


Fig. 10 Comparison of crater profile predicted by experimentally obtained fitting functions and the experimental data.

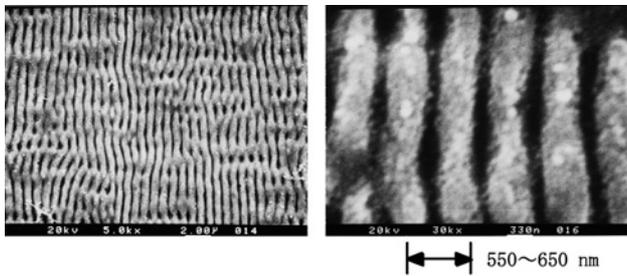


Fig. 11 SEM images of copper target surface irradiated the femtosecond laser pulses which show periodical structure.

メージを分析し、加工痕の底面に波長サイズの周期的構造ができることを偶然に発見した[24]。それを機にさまざまな固体物質について、レーザー波長、パルス幅をパラメータとして多くの研究報告がなされてきた。周期構造は入射光と表面にできるプラズマ波[25]もしくは散乱波[26]との干渉によりできる定在波が起因しており、また偏光方向にも依存することが報告されている。これまで報告[27]されている周期構造の間隔 d は、レーザーの入射角 θ に依存し $d = \lambda(1 \pm \sin \theta)$ の関係で変化する。 $\theta = 0^\circ$ の入射角(ターゲット面に対して垂直入射)で間隔 d は、照射レーザー波長 λ と同程度でそれ以下になることはなかった。

フェムト秒レーザー照射の場合でも、ターゲット上に周期構造形成が見出されており、その周期はレーザー波長よりも短いことが報告されている。Fig. 11 にフェムト秒レーザーの照射によって生成された自己形成周期構造の写真を示す。レーザーの干渉パターンを用いずに、ターゲット上でスポットを掃引するだけで回折格子状の構造を大面積で作り出すことができる。可視光の回折による虹色の反射が目視で確認できることから、照射領域全般にわたって構造の規則性が高いことがわかる。構造の方向性はレーザーの偏光方向に強く依存しており、フェムト秒加工現象にレーザーの電界が大きく影響していることが裏づけられる。

この周期構造のアスペクト比を調べるために、銅針の先端にレーザー旋盤[28]の原理で細いボルト状の細線の製作

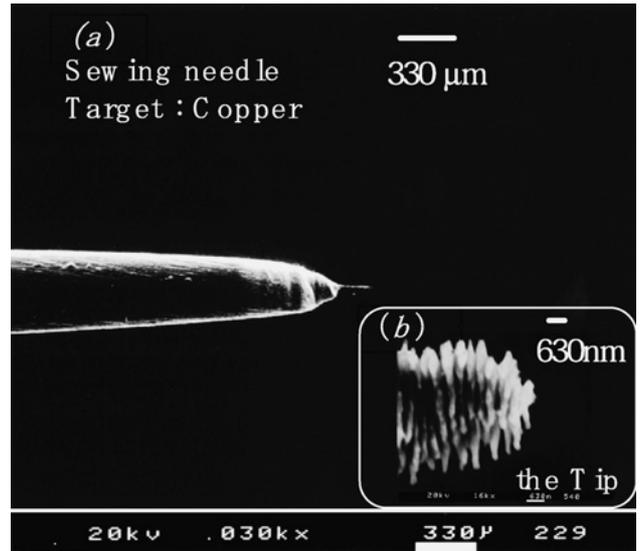


Fig. 12 SEM images of the tip of a needle sharpened by the femtosecond laser pulses.

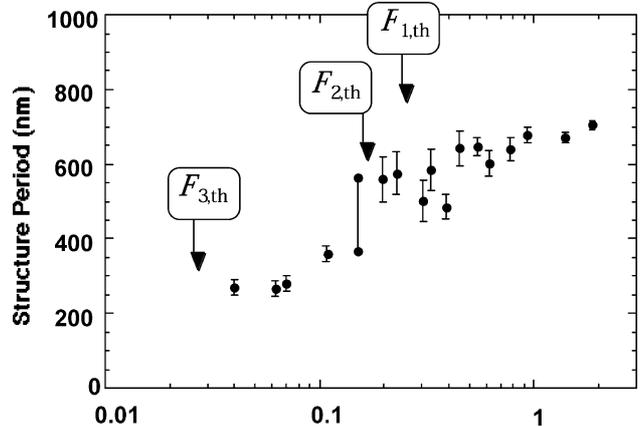


Fig. 13 Structure period as a function of laser fluence.

を試みた。Fig. 12 には、製作された直径 $3 \mu\text{m}$ 長さ $200 \mu\text{m}$ のボルト状細線の走査型電子顕微鏡観察写真を示す。Fig. 12 (b) は先端部分を拡大したものでボルト状細線のピッチは、約 260 nm 、深さ約 500 nm であった。

また、フェムト秒レーザーによる金属材料 (Cu, Fe, Al, Mo, Ni) 表面上に形成された周期構造は、Fig. 13 に示すようにレーザーフルエンスを制御することで周期間隔が波長よりも短くなることが報告されている[29]。

最近、この周期構造に表面摩擦の低減効果があることが報告された[30]。また、フェムト秒パルスによりガラス内部に形成されたドット(屈折率変化部)の中にも波長より短い周期構造が観察されている[31]。

4. 元素分析への応用

LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) 法による元素分析は固体、液体、粉末物質に利用できるため、放射性廃棄物の元素分析、MOX 燃料(ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料)の品質管理、金属廃棄物の分別法の分野で注目されている[32]。現状ではレーザーとして、出力安定性、高出力の観点から、ナノ秒のパルス幅のものが使わ

れている[33, 34]. 分析感度は最高で0.001%濃度で混合物質の成分分析結果が報告されている. これまでの問題点として, 用いるレーザーのパルス幅が長いために, LIBS法により生成されるプラズマとレーザーとの相互作用の結果, 分析感度が数%にまで低下することになった. 近年, すべての元素においてより高い分析感度(数%以下)を得るために, フェムト秒レーザーに置き換えることが検討されている[35]. フェムト秒レーザーの場合, プラズマが生成される時間(10^{-12} 秒)よりもパルス幅が十分に短いため, プラズマによる測定感度の低下を無視でき, 元素に関係なく高い分析感度を実現できる. また, フェムト秒レーザーではナノ秒レーザーに比べて, 極めて低いレーザーエネルギーで同等の測定感度を実現できる. Fig. 14 (a)にはLIBS法による銅合金の元素分析結果の一例を示す. Fig. 14 (b)には, 性能比較のため走査型電子顕微鏡を使ったX線分光(銅のK- α 線)法による結果を示す. LIBS法とはレーザーを対象物質表面に集光照射して, 生成されるプラズマの発光を分光器を使ってスペクトル分解し物質の成分分析を行うものである. LIBS法の特徴は, 空気中で実施できる点にある. このため, 対象とする物質の大きさには制限はない. また, レーザービームをレンズで集光すれば $6\mu\text{m}$ の範囲にまで絞れるため, ミクロ成分分析が可能となる. 一方, 集光せずに照射した場合, 数mmの範囲のマクロ(平均的)成分分析に使うことができる. この2つの手法により, MOX燃料の品質管理がより高い信頼度で行える. 放射性廃棄物の元素分析, 金属廃棄物の分別法についても強力なツールになりえる.

5. ナノ粒子生成への応用

大気中で物質のアブレーションを行うと, 発生した物質が凝固し微粒子となって飛散する. パルス幅100 fs, 波長800 nmのレーザーを用いて銅を大気中でアブレーションさせ, 飛散微粒子を基板上に捕捉することが試みられた. 基板の拡大写真をFig. 15に示す. 基板上に幅100 nm以下の金属線で繋がったナノ粒子構造物が観察されている. 金属・合金・半導体などをターゲットとした時に生成されるナノ微粒子の特性が今後明らかになれば, 興味深い応用が展開できるものと期待される.

6. 半導体アニーリングへの応用

フェムト秒レーザーを用いた実験技術の進歩により非熱的なレーザー誘起構造変化の研究が飛躍的に進歩した[36]. 物質の構造がレーザー照射により不安定化するには, 1) レーザーから電子に与えられたエネルギーがイオンの熱運動に変換される(ピコ秒以上の時間スケール), または2) レーザーにより多くの電子が束縛状態から励起され原子内部の反発力により瞬間的な格子の変形をもたらす(サブピコ秒の時間スケール), という2通りのメカニズムが考えられる. これらの現象をさらに理解し活用することで, 光による物質の電子的・構造的制御技術が発展すると期待されている.

エキシマレーザーを用いたアニーリングは, ドーパント

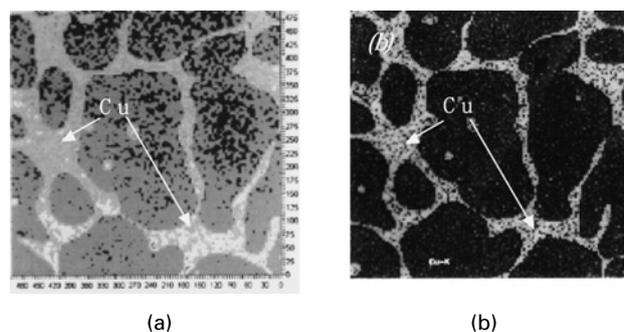


Fig. 14 Comparison of spectroscopic images of copper alloy obtained by (a) laser induced breakdown by using the femtosecond laser pulse and (b) K- α emission.

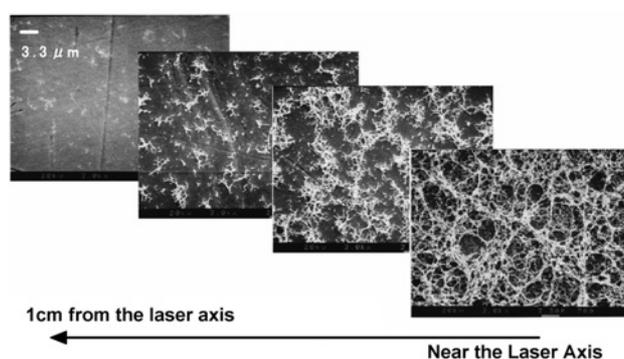


Fig. 15 SEM image of debris produced by the femtosecond laser ablation.

の活性化に有効であるとともに, フルーエンスを制御して照射することによりドーパントの拡散を抑制する技術も開発され注目されているが, 溶融過程を経て再結晶化する際に発生する欠陥のために接合のリーク電流を抑制する技術についても開発が進められている[37]. 一方, ドーパント層の溶融を伴わない新しい活性化技術としてフェムト秒レーザーの利用が考えられている[38]. フェムト秒レーザーを用いて熱的に非平衡状態で直接格子振動を誘起できれば, 20 nm程度の浅い領域に不純物イオンの拡散を促進することができるものと期待されている. 新技術としての可能性を検討するため, Siについて格子振動誘起が試みられている. 本研究は始まったばかりであり, 結果を解釈するため, レーザー強度などをパラメータとしてさらに詳しい実験が進められている. 浅い領域に不純物イオンの拡散を抑えることができれば, 本手法は, 超LSIデバイスの高性能化と高集積化のための次世代技術となるであろう.

一方, 純粋に電子運動のみを誘起するフェムト秒レーザーは, 超高速の相変化を制御することを可能にするかもしれない. 半導体が格子変化を伴わずに金属的な振る舞いをすれば, フェムト秒光スイッチング技術へと発展が期待される[36].

7. まとめ

近年, フェムト秒レーザーは様々な研究分野で有用なツールとして重要性を増している. フェムト秒レーザーパルスの特徴である超高速性や超高電界を利用した加工分野での研究が進展している. フェムト秒レーザーアブレーション

ション実験において、複数の顕著な閾値の存在、再現性よく予測可能なアブレーション、ナノ周期構造の自己形成など、これまでのレーザーアブレーションでは見られなかった現象が観測され微細加工分野への応用が期待されている。また、フェムト秒レーザー照射した金属からの X 線発光は微量な元素分析へと応用可能であることが見いだされている。大気中でのフェムト秒レーザーアブレーションで発生したデブリはナノ微粒子であることが観測されており、新たなナノテクの手法として興味深い。超高速の非熱的プロセスは半導体の相変化を自在に制御できる可能性があり産業応用への展開が模索されている。

本稿では、主にフェムト秒レーザー照射によって生じる特徴的なアブレーション現象を中心にレーザー応用のトピックスを紹介したが、フェムト秒レーザーはこれまでにないプロセスツール・計測ツールとして情報通信、ナノテクノロジー、医療、環境など広範な分野で利用され新たなレーザー応用の展開を促すものと期待されている。

参考文献

- [1] 鍋川康夫, 藤田雅之: 電気学会誌 **122**, 754 (2002).
- [2] 宮崎健創: レーザ加工学会誌 **8**, 221 (2001).
- [3] 小原實, 藤田雅之: 電気学会誌 **122**, 740 (2002).
- [4] 橋田昌樹: 電気学会誌 **122**, 749 (2002).
- [5] 橋田昌樹, 藤田雅之, 節原裕一: 光学 **31**, 621 (2002).
- [6] 橋田昌樹, 藤田雅之: 応用物理学会誌 **73**, 178 (2004).
- [7] M.D. Shirk and P.A. Molian, *J. Laser Appl.* **10**, 18 (1998).
- [8] S.D. Brorson, A. Kazeroonian, J.S. Moodera, D.W. Face, T.K. Cheng, E.P. Ippen, M.S. Dresselhaus and G. Dresselhaus, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2172 (1990).
- [9] S.I. Anisimov and B. Rethfeld, *Proc. SPIE Nonresonant Laser-Matter Interaction (NLMI-9)*, **3093**, 192 (1997).
- [10] P.B. Corkum, F. Brunel and N.K. Sherman, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2866 (1988).
- [11] C. Momma, B.N. Chichkov, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tunnermann, H. Welling and B. Wellegehausen, *Opt. Comm.* **129**, 134 (1996).
- [12] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Alvensleben and A. Tunnermann, *Appl. Phys. A* **63**, 109 (1996).
- [13] S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tunnermann, B.N. Chichkov, B. Wellegehausen and H. Welling, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, 2176 (1997).
- [14] K. Furusawa, K. Takahashi, H. Kumagai, K. Modorikawa and M. Obara, *Appl. Phys. A* **69** [Suppl.] S359 (1999).
- [15] B.C. Stuart, M.D. Feit, S. Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore and M.D. Perry, *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 459 (1996).
- [16] P.P. Pronko, S.K. Dutta, J. Squier, J.V. Rudd, D. Du and G. Mourou, *Opt. Comm.* **114**, 106 (1995).
- [17] S.S. Wellershoff, J. Hohlfeld, J. Gudde and E. Matthias, *Appl. Phys. A* **69** [Suppl.] S99 (1999).
- [18] P.P. Pronko, S.K. Dutta, D. Du and R.K. Singh, *J. App. Phys.* **78**, 6233 (1995).
- [19] S. Preuss, A. Demchuk and M. Stuke, *App. Phys. A* **61**, 33 (1995).
- [20] M. Hashida, A. Semerok, O. Gobert, G. Petite and J.F. Wagner, *Proc. SPIE* **4423**, 178 (1999).
- [21] M. Hashida, A. Semerok, O. Gobert, G. Petite, Y. Izawa and J.F. Wagner, *Proc. The 6th International Conference on Laser Ablation* (2001) p.137.
- [22] 橋田昌樹, 古河裕之, 藤田雅之, 塚本雅裕, 井澤靖和: ILT2002年報, ISSN 1340-6167, 77 (2002).
- [23] 藤田雅之, 橋田昌樹: ILT2004年報, ISSN 1340-6167, 1 (2004).
- [24] M. Birnbaum, *J. Appl. Phys.* **36**, 3688 (1965).
- [25] A.M. Bonch-Bruевич, M.N. Libenson, V.S. Markin and V. Trubaev, *Opt. Eng.* **31**, 718 (1992).
- [26] D.C. Emmony, R.P. Howson and L. J. Willis, *Appl. Phys. Lett.* **23**, 598 (1973).
- [27] E.E.B. Campbell, D. Ashkenasi and A. Rosenfeld, *Material Science Forum* **301**, 123 (1999).
- [28] 河村良行: レーザー研究 **24**, 460 (1996).
- [29] 橋田昌樹, 長嶋謙吾, 藤田雅之, 塚本雅裕, 甲藤正人, 井澤靖和: *Proc. 9th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics* (2003) p. 517.
- [30] 沢田博司, 川原公介, 二宮孝文, 森淳暢, 黒澤宏: 精密工学会誌 **70**, 133 (2004).
- [31] J. Qiu, 平尾一之: レーザー研究 **30**, 233 (2002).
- [32] P. Fichet, P. Mauchien and C. Moulin, *Appl. Spectrosc.* **53**, 1111 (1999).
- [33] C. Geertsen, J.L. Lacour, P. Mauchien and L. Pierrard, *Spectrochim. Act. B* **51**, 1403 (1996).
- [34] B. Salle, M.N. Libenson, P. Mauchien, G. Petite, A.F. Semerok and J.F. Wagner, *Proc. SPIE Process, Equipment, and Materials Control in Integrated Circuit Manufacturing* **3882**, 56 (1999).
- [35] B. Salle, O. Gobert, P. Meynadier, M. Operix, G. Petite and A. Semerok, *Appl. Phys. A* **69**, S381 (1999).
- [36] S.K. Sundaram and E. Mazur: *Nature Materials*, **1**, 217 (2002).
- [37] H. Tsukamoto, *Solid-State Electron.* **43**, 487 (1999).
- [38] Y. Setsuhara, B. Mizuno, M. Takase, M. Hashida, M. Fujita and S. Adachi, *Extended abstracts of The 2nd Int. conf. on junction technology* (2001) p.103.