軟X線による物質アブレーション

牧村 哲也¹, 錦野 将元², 河内 哲哉²

¹筑波大学 数理物質科学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 (〒619-0215 京都府木津川市梅美台8-1-7)

Ablation Using Soft X-ray Sources

Tetsuya MAKIMURA,¹ Masaharu NISHIKINO,² and Tetsuya KAWACHI²

¹Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, Ten'nodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8573

²Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, 8-1-7 Umemidai, Kizugawa, Kyoto 619-0215

(Received October 22, 2013)

X-ray ablation has been recently achieved using plasma soft X-ray lasers, laser plasma soft X-rays, and X-ray free electron lasers. Nanosecond laser plasma soft X-rays sources allow us to fabricate high-quality micro- and nano-structures of poly (methylmethacrylate) (PMMA), poly (dimethylsiloxane) (PDMS), and SiO₂. Even after the soft X-ray irradiation, the surfaces of these materials have the same chemical structures as those of unirradiated surfaces. We found that ablation of SiO₂ occurs more efficiently than linear optical absorption and energy accumulation to break all of the bonds in SiO₂ surfaces. Picosecond plasma soft X-ray laser sources allow us to ablate LiF crystals at a low threshold fluence. The ablation is explained in terms of spallative ablation, that is, removal of a surface layer by tensile stress induced by the short-pulse X-ray irradiation, without breaking the layer into atomic species. It should be noted that nanostructures such as nano-cones on Al surfaces can be fabricated by irradiation with the plasma soft X-ray laser light

Key Words: Plasma soft X-ray laser, Laser plasma soft X-ray, Ablation, Etching

1. 軟X線によるアブレーション

プラズマ軟X線レーザー, レーザープラズマ軟X線源, X線自由電子レーザーの開発により, 軟X線によるアブレーションが実現できるようになってきた. 波長が短い光を用いることから, 高い解像度および高いアスペクト比の改質, 加工が期待できる. 本稿では, おおよそ5 nmから40 nmの範囲の軟X線を固体に照射し, その表面から構成原子が爆発的に剥ぎ取られるアブレーションについて扱う. まず, 従来の赤外から紫外までのレーザーによるレーザーアブレーションと比較しながら, 軟X線によるアブレーションの特徴を述べる. 次に, ナノ秒レーザープラズマ軟X線およびプラズマ軟X線レーザーによるアブレーションの研究の現状と将来展望について述べる.

1.1 シンクロトロン放射光によるエッチング

PMMAに軟X線を照射するとその領域が改質する. シンクロトロン放射光を用いた微細加工技術に, Lithographie Galvanoformung und Abformung (LIGA) プロセスがある¹⁾. このプロセスでは, PMMAやSU-8などの感光性ポリマーにマスクを通してシンクロトロン放射光

を照射し, 感光させる. さらに溶媒によりエッチングする. 作製できる構造が2次元的に限定されるが, 高アスペクト比のポリマーの微細構造体が作製されている. さらに, その構造体に, 電鍍することにより, 金属の金型が作製できる. さらに任意の3次元構造を作製するためには, 直接軟X線により直接ポリマーのエッチング(アブレーション)を行う必要がある. PTFEは軟X線により直接エッチングが可能なポリマーである²⁾. Teflon Included Etching Galvanoformung (TIEGA) 法³⁾では, さらに, 作製したPTFE構造体にNi電鍍を行い, Niの構造体を作製されている. これは, 高アスペクト, 3次元, 微細加工を実現できる重要な技術である.

軟X線の領域では, Si, SiO₂のシンクロトロン放射光によるエッチングが報告されている⁴⁾. ただし, 本稿で扱う軟X線と比較し, 強度が弱くエッチングレートが1 nm/min. の程度と低い. また, SiO₂表面は, シンクロトロン放射光照射によりSiリッチになる. 同様に, 発振波長が126 nmのAr₂レーザー光を照射したSiO₂表面は, 完全なSiに改質できることが報告されている⁵⁾.

1.2 アブレーションプロセス

軟X線を固体に照射すると, 表面から100 nm程度で吸

収される⁶⁾。また、物質と光子エネルギーによるが、内殻電子を励起することができる。その後、構成原子の原子番号に依存し、軽い原子では、Auger緩和が起きる⁷⁾。さらにそれに続くバンド内緩和により伝導体の底(分子の場合はLUMO)へ電子の緩和および価電子帯のトップ(HOMO)への正孔の緩和する。

軟X線によるアブレーションの特徴の1つは、アブレーション粒子とパルス幅内の軟X線との相互作用が小さいことである。紫外やそれよりも波長が長いパルス光により、固体表面がアブレーションされる場合を考える。この場合、同時に放出された電子が、パルス幅内の光により、逆制動輻射過程を経て加速され運動エネルギーを受け取る。その加速された電子はアブレーションにより放出された原子や分子などの粒子に衝突し、その粒子をイオン化したり、より高い励起状態に励起したりする。このイオン化過程により、プラズマが生成し、より強くレーザー光を吸収するようになる。この結果、直接固体表面に入射しアブレーションを起こす割合は低くなる。代わりに、プラズマが固体表面と接触しアブレーション過程に寄与する。以上のアブレーション過程のうち、プラズマ生成や加熱に寄与する逆制動輻射やプラズマによる吸収の効率は、光子エネルギーに依存する。軟X線によるアブレーションの場合には、軟X線の光子エネルギーが大きいために逆制動輻射過程の寄与が小さくなるためにプラズマの加熱が起こりにくくなる。その結果固体表面近傍の原子の内殻を含む束縛電子を直接光電離する過程が主な吸収過程となる。

レーザーアブレーションを理解する上での出発として、以下のモデルを考える。(1)物質と光との相互作用が、単位面積あたりのパワー P と相互作用の強さ α を用いて、光吸収の場合と同じように $dP = -\alpha P dz$ と表される。(2)吸収されたエネルギーは、吸収された領域から外には拡散しない。(3)あるしきい値パワー密度 P_{th} を越えたら、その領域はアブレーションに至る。このとき、赤外から紫外のレーザー光によるアブレーションの場合については、経験的に、アブレーション深さ d は、

$$d = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{P}{P_{th}} \quad (1)$$

と表現される^{8,9)}。実験的に得られる α および P_{th} の値や d の式(1)からのずれは、アブレーションプロセスを理解する上で重要な情報を与える。

2. アブレーションを実現するための軟X線光源

軟X線を用いることによる高い空間分解能で高いアスペクト比の加工を目指す場合、光子エネルギーは大きい方がよい。一方で、どのような物質でも、軟X線領域から硬X線領域に移っていくに従って、光吸収が弱くなり、光のエネルギーを高い密度で物質に伝達できなくなる。従って、高い空間分解能で物質に光のエネルギーを伝達するためには、軟X線領域の光が適する。さらに、固体表面に軟X線を入射することによりアブレーション

を起こすためには、固体表面で一定のパワー密度が必要である。

これまでに、シンクロトロン放射光^{2,4)}、レーザープラズマ軟X線、X線自由電子レーザー光^{10,11)}、プラズマ軟X線レーザー光により物質アブレーションが報告されてきた。

ナノ秒レーザープラズマ軟X線によりアブレーションの研究は、ポーランドのFiedorowiczらのグループ¹²⁾、ドイツのMannらのグループ^{13,14)}、筑波大学の筆者らのグループ¹⁵⁻¹⁸⁾、大阪大学の西村らのグループにより行われている。これらの研究では、ドライバーレーザーとしてNd:YAGレーザーもしくはパルスCO₂レーザーを用い、そのレーザー光をTa, Au, Snなどの金属ターゲットもしくは気体または固体のXeに照射して軟X線を発生している。アブレーションを実現するために、発生した軟X線を効率よく集光し、高いパワー密度で物質に照射する必要がある。そのために、シュワルツシルド結像光学系、楕円ミラー、ロブスターアイが用いられてきている。

プラズマ軟X線レーザーは、高温高密度のレーザー生成プラズマを増幅利得媒質として利用し、プラズマ中の多価イオンの励起状態間反転分布により特定の発光線を増幅することで得られる。1980年代に慣性核融合用の超大型レーザーを励起光源とした原理実証に成功した後小型化が進み、現在では商業ベースのチタンサファイアレーザーやレーザーダイオード(LD)励起のYb:YAGレーザーを励起光源として、波長6 nm~30 nm、ピコ秒の時間幅、繰返し10 Hzのレーザーが実現しており¹⁹⁾、特に波長18.9 nmにおいては、繰返し100 Hz、平均出力0.15 mWのレーザーが報告されている。

3. ナノ秒レーザープラズマ軟X線によるアブレーション

Fig. 1に四角い穴が格子状に配列したコンタクトマスクを通してレーザープラズマ軟X線を照射しアブレーション加工したPMMAの表面構造を示す。マスクの形に応じて、マイクロメートルの長さ領域で精密にアブレーション加工されていることが分かる。

Fig. 2にパルスあたりのアブレーション深さ(アブレーションレート)を示す。0.1 Hzで5 nmから25 nmの範囲の

Fig. 1 Surface profile of PMMA after soft X-ray irradiation. Square holes with a pitch of 25.5 μm are fabricated on a PMMA surface.

レーザープラズマ軟X線を照射した場合、アブレーションレートは式(1)で表される関係になり、 α は光吸収係数とほぼ一致する。PDMSでも同様に、マイクロメートルのスケールで精密にアブレーション加工ができ、アブレーションレートは、式(1)で表される関係になる。これらの物質では、 α は光吸収係数とほぼ一致し、軟X線のエネルギーが光吸収により表面に伝達されアブレーションされると考えられる。軟X線照射後のXPS測定により、両者とも表面の化学的構造はほぼ未照射のものと一致することが明らかとなっている。PDMSに紫外レーザー光をアブレーションしきい値近傍のパワー密度で照射すると、表面はSiO₂に近い物質に改質できることが報告されている。これと比較し、軟X線アブレーションでは、軟X線照射後も改質が起きない。

SiO₂の場合には、レーザープラズマ軟X線によるアブレーションにより幅50 nm、アスペクト比1のナノトレンチを作製できる。また、150 nm/shotまでの高いレートでアブレーションでき、典型的には500 nmの深さまでアブレーションした後の表面粗さが1 nmである。シンクロトロン放射光エッチングやAr₂レーザー光照射では、照射表面がSiに改質されるが、軟X線でアブレーションした後の表面では、組成の変化は検出できなかった。このようにレーザープラズマ軟X線によるアブレーションは、高品位なマイクロ・ナノ加工に有利な特性を有する。アブレーションレートは、式(1)で表すことができる。ただし、 $1/\alpha$ は10 nmであり、光吸収係数で決まる吸収深さ(100 nm)の1/10の距離でエネルギー伝達が始まる。このように、軟X線とSiO₂との強い相互作用が明らかとなった。このことは、光吸収長で決まる深さまで、原子の結合を切断するのに必要なエネルギー密度の光を入射する場合と比較し、1/10のパルスエネルギーの軟X線を入射するだけでアブレーションしきい値を越えられることを意味する。このように効率が非常に高いアブレーション過程が見出された。

さらに、軟X線照射により、熱的な蒸発では説明できない大きな運動エネルギーを有するイオンがSiO₂表面から放出されることが分かっている²⁰⁾。先に述べたように、軟X線アブレーションにおいては、アブレーション粒子は、表面から放出された後は、イオン化過程や加熱過程が無視できる。従って、イオン化は固体の密度のSiO₂表面で生成されていると考えられる。放出原子の

1%程度がイオン化しているとしても、アブレーションされた領域にそのイオンが生成されたとすると、固体をガスにするのに必要なエネルギーより2桁大きな静電エネルギーが蓄積されることになる。このイオン間斥力によりアブレーションが起きると考えられる。

ここでは、レーザープラズマ軟X線によるPMMA、PDMS、SiO₂のアブレーションについて述べた。軟X線照射後も改質を起こさずに、マイクロ・ナノ加工が可能である。これらの材料は、微小化学分析器(いわゆる μ TASやLab-on-a-Chip)や細胞の操作を行うための流路を形成するのに有用な材料である。軟X線アブレーション加工は、これらの材料の実用的なマイクロ・ナノ加工法として期待できる。特に、貫通孔を作製し、3次元流体回路を構築する上で有用であると考えられる。

4. ピコ秒X線レーザーによるアブレーション

プラズマX線レーザーによる物質アブレーションまたは表面改変に関する研究は、2006年頃から始まっている。ネオン様アルゴンプラズマからの放電型プラズマ軟X線レーザー(波長46.9 nm, パルス幅1.7 ns)の多重照射により、LiF結晶の表面にFig. 3 (a)のようなアブレーション痕が観測されており、その際のアブレーションしきい値(フルエンス)は100 mJ/cm²程度と報告されている²¹⁾。この値は可視～赤外領域のレーザーの場合(3–10 J/cm²)に比べて2桁近く低い値である。同時期にコロラド大学では、同じ46.9 nmレーザーをPMMA(ポリメタクリル酸メチル樹脂)試料に照射し、アブレーションしきい値を利用して集光径よりも小さなサイズの表面加工をシングルショット露光により行っている。46.9 nmレーザーをフレネルゾーンプレートで集光する際に、焦点面から7 μ mずらした位置に試料を置き、その位置での回折パターンの中心ピークのみを用いることで集光径268 nmよりも小さな直径82 nm、深さ8 nmのクレータを生成している²²⁾(Fig. 3 (b))。

ピコ秒領域の短パルスのプラズマ軟X線レーザーを用いた物質アブレーション実験は、原子力機構のニッケル様銀イオンプラズマからの13.9 nmレーザー(パルス幅7 ps)を誘電体結晶(LiF結晶)に照射することで行われ、13.9 nmレーザーの侵入長にほぼ等しい深さ約50 nmのアブレーション痕が得られている。この実験から得られたアブレーションしきい値は5 mJ/cm²であり、ナノ秒およびピコ秒のパルス幅の赤外レーザーによるアブレーションしきい値よりも3桁²³⁾、また上記放電型の46.9 nmレーザーと比較しても一桁程度低くなっている²⁴⁾。高輝度軟X線パルスによるアブレーションしきい値が極端に低いことは、超微細材料加工技術の可能性という点で興味深い。可視・赤外領域のフェムト秒レーザーによる非熱的加工は、入力レーザーエネルギーの熱拡散長を低減することで集光位置周辺の表面改変領域を小さく抑え(数100 nm程度)、結果として高い加工精度を可能にしている。アブレーションしきい値が極端に低い高輝度軟X線を用いれば、加工に必要な入力エネルギーが更に小さく

Fig. 2 Ablation rate of PMMA as a function of power density of soft X-rays. (Ref. 18).

Fig. 3 (a) Ablation trace on LiF crystal generated by 25 shots of 46.9 nm discharge pump soft X-ray laser. The total energy fluence is 3 J/cm^2 (Ref. 21). (b) Nano-hole generated by single shot exposure of the 46.9 nm laser. The diameter is 82 nm and the depth is 8 nm (Ref. 22).

なり，結果として表面改変領域を桁違いに小さくできる可能性を示している。

短パルスのプラズマ軟X線レーザーを用いた場合にアブレーションしきい値が低くなる原因を流体シミュレーションと分子動力学シミュレーションによって説明する試みが行われている。プラズマ軟X線レーザーは物質への侵入長が短いので，X線レーザー照射直後に固体表面付近に局所的な高温領域が生成する。局所的な温度上昇は，急激な圧力上昇を引き起こし，レーザー照射直後において固体内部と固体表面に向かう圧縮応力波を生成する。固体表面へ達した圧縮応力波は符号を変えて引張り応力波として内部へ戻り材料の破断応力値を超えたところで破碎的なアブレーション(spallative ablation)が起こる可能性が示されている²⁵⁾。

プラズマ軟X線レーザーを金属に照射した際の，物質アブレーションおよび表面改変の最近の実験例として，Fig. 4に波長13.9 nmレーザーを金属((a)金と(b)アルミニウム試料)に照射した際の照射痕を示す²⁶⁾。照射フルエンスは金の場合が 65 mJ/cm^2 ，アルミの場合が 14 mJ/cm^2 である。金については，レーザー加熱時の状態方程式がこれまでに精力的に調べられており，実験と理論計算の比較が可能である。Fig. 5は，横軸を照射フルエンスとして，実験で得られた照射痕の深さ(改変深さ)と分子動力学計算による計算結果を比較したものである²⁷⁾。実験結果は(●)で示しており，実線はアブレーション深さの計算結果，破線は金の熔融深さである。軟X線を用いた今回の実験による照射痕の深さと照射フルエンスの関係は，低い照射フルエンス領域からほぼ同じ勾配で増加しており，グラフ上に示した可視レーザーの場合の理論計算(点線)や実験データ(△，■，◆)と比べてかなり異なった様相を示している。

Fig. 5の低フルエンス領域(50 mJ/cm^2 以下)においては，13.9 nmレーザー照射の実験で得られた照射痕深さ

Fig. 4 SEM images of the 13.9 nm ablation traces on Au with the energy fluence of 65 mJ/cm^2 ; (a) and that on Al with the energy fluence of 14 mJ/cm^2 ; (b). (Ref. 26).

は，現状の計算モデルに基づく解釈を行うとアブレーション深さよりもむしろ熔融深さに近い結果を示している。これは熔融した金属の流動が照射痕として観測されていることを示している。一方で高いフルエンス領域(80 mJ/cm^2 以上)では，実験結果と2つの計算結果がほぼ同じ結果を示していることから，熔融した金属部分が全て飛散していくアブレーション過程に移行していることが考えられる。このように高輝度軟X線による物質表面の照射痕形成過程も，複数の異なる過程の総体で決まっており，詳細な実験と理論計算の比較により各フルエンスにおいて主要な過程を明らかにしていく必要がある。

また，Fig. 4 (b)のアルミの場合には，比較的低いフルエンス領域において，大きさ $80 - 100 \text{ nm}$ (高さ 30 nm 程度)の円錐状の突起が一樣にほぼ等間隔に形成されることが示されている。照射条件の十分な制御が可能になれば機能性材料の創出等の観点からも興味深い現象である。このナノ構造の形成原因はまだ明らかではないが，13.9 nmレーザー照射時の照射強度分布の不均一さが材料表面に破砕(spallation)を起こす核を形成し，その核を起点とする材料表層の部分的な隆起がナノ構造を形成している可能性がある。今後，円錐状構造内部の密度計測や，紫外線～軟X線領域のコヒーレントプローブビームによるナノ構造形成ダイナミクスの観測等を行うことで，この原因を調べる必要がある。

5. 結 言

最近，プラズマ軟X線レーザー，レーザープラズマ軟X線，X線自由電子レーザーの開発により，軟X線によるアブレーションが実現できるようになってきた。波長が短い光を用いることから，高い解像度および高いアスペクト比の改質，加工が期待できる。赤外から紫外までのレーザーと比較し，軟X線はアブレーションにより放出された粒子との相互作用が小さく，効率よく固体表面に入射する。

Fig. 5 Comparison of experimental ablation depth (closed circle) with the theoretical result by molecular dynamics (MD) simulation. The solid line and the hatched line is the ablation depth and melting depth, respectively. (Ref. 27).

ナノ秒レーザープラズマ軟X線により、PMMA、PDMS、SiO₂をアブレーションすることにより、高品位なマイクロ・ナノ加工が実現できる。いずれも軟X線照射による物質表面の改質は観測されず、ナノ秒レーザープラズマ軟X線によるアブレーションは、加工に有用な特性を有する。PMMAおよびPDMSに軟X線を照射すると、光吸収長と同じ領域でエネルギー伝達が始まる。これに対して、SiO₂とは光吸収長よりも1桁短い長さでエネルギー伝達が始まり、アブレーションに至るといって、効率が良い過程を見出した。

プラズマX線レーザーによる物質アブレーションの研究はまだ日が浅い分野であるが、軟X線の光子エネルギーの高さによる物質との相互作用の特徴や、その結果として現れるアブレーションしきい値の低さなど、超微細加工技術につながる興味深い可能性を示しつつある。高輝度軟X線による材料の表面改変という観点からは、前述のアルミ表面の80 nmから100 nmの大きさの円錐状構造の形成など、ナノ構造による機能性材料創出という観点から非常に興味深い結果も得られ始めている。一方で、軟X線領域の高輝度パルスで物質を照射する際の、ナノ構造形成過程等の物理的な描像を早急に明らかにすることが必要である。そのためには精密な実験の実施とモデル計算との詳細な比較を通じて、モデリングの精度を上げていく必要がある。

参考文献

- 1) E. W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, and D. Munchmeyer: *Microelectronic Engineering* **4** (1986) 35.
- 2) T. Katoh, N. Nishi, M. Fukagawa, H. Ueno, and S. Sugiyama:

- Sensors and Actuators A: Physical* **89** (2001) 10.
- 3) 加藤 隆典: *溶接学会誌* **71** (2002) 154.
- 4) H. Akazawa, J. Takahashi, Y. Utsumi, I. Kawashima, and T. Urisu: *J. Vac. Sci. Technol. A* **9** (1991) 2653.
- 5) K. Kurosawa, P. Herman, E. Kurmaev, S. Shamin, V. Galakhov, Y. Takigawa, A. Yokotani, A. Kameyama, and W. Sasaki: *Appl. Surf. Sci.* **126** (1998) 83.
- 6) B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis: *At. Data. Nucl. Data Tables: Condens. Matter* **54** (1993) 181.
- 7) M. O. Krause: *J. Phys. Chem. Ref. Data* **8** (1979) 307.
- 8) R. Srinivasan and B. Braren: *J. Polym. Sci.* **22** (1984) 2601.
- 9) P. R. Herman, R. S. Marjoribanks, A. Oettl, K. Chen, I. Kononov, and S. Ness: *Appl. Surf. Sci.* **154-155** (2000) 577.
- 10) J. Krzywinski, R. Sobierajski, M. Jurek, R. Nietubyc, J. B. Pelka, L. Juha, M. Bittner, V. Létal, V. Vorlíček, A. Andrejczuk, *et al.*: *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 043107.
- 11) N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovskii, A. Ya. Faenov, V. E. Fortov, Y. Kato, V. V. Shepelev, Y. Fukuda, M. Kishimoto, M. Nagasono, H. Ohashi, *et al.*: *J. Opt. Tech.* **78** (2011) 473.
- 12) H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Bittner, L. Juha, J. Krasa, P. Kubat, J. Mikolajczyk, and R. Rakowski: *Microelectronic Engineering* **73-74** (2004) 336.
- 13) F. Barkusky, C. Peth, and A. Bayer: *J. Appl. Phys.* **101** (2007) 124908.
- 14) F. Barkusky, A. Bayer, C. Peth, and K. Mann: *J. Appl. Phys.* **105** (2009) 014906.
- 15) T. Makimura, S. Mitani, Y. Kenmotsu, K. Murakami, M. Mori, and K. Kondo: *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 1274.
- 16) T. Makimura, H. Miyamoto, Y. Kenmotsu, K. Murakami, and H. Niino: *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005) 103111.
- 17) T. Makimura, S. Uchida, K. Murakami, and H. Niino: *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 10118.
- 18) S. Torii, T. Makimura, K. Okazaki, D. Nakamura, A. Takahashi, T. Okada, H. Niino, and K. Murakami: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 066502.
- 19) D. Alessi, Y. Wang, D. Martz, B. Luther, L. Yin, D. H. Martz, M. R. Woolston, Y. Liu, M. Berrill, J. J. Rocca: *Phys. Rev. X* **1** (2011) 021023.
- 20) 牧村 哲也, 新納 弘之, 鳥居 周一, 村上 浩一: *電気学会論文誌 C* **129** (2009) 595.
- 21) A. Ritucci, G. Tomassetti, A. Reale, L. Arrizza, P. Zuppella, L. Reale, L. Palladino, F. Flora, F. Bonfigli, A. Faenov, *et al.*: *Opt. Lett.* **31** (2006) 68.
- 22) G. Vaschenko, A. Garcia Etxarri, C. Menoni, J. Rocca, O. Hemberg, S. Bloom, W. Chao, E. Anderson, D. Attwood, Y. Lu, *et al.*: *Opt. Lett.* **31** (2006) 3615.
- 23) S. J. Henley, G. M. Fuge, and M. N. R. Ashfold, *J. Appl. Phys.* **97** (2005) 023304.
- 24) A. Faenov, N. Inogamov, V. Zhakhovskii, V. Khokhlov, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 231107.
- 25) N. Inogamov, A. Faenov, V. Khokhlov, V. Zhakhovskii, Yu Petrov, I. Skobelev, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T. Pikuz, *et al.*: *Contributions to Plasma Phys.* **49** (2009) 455.
- 26) M. Ishino, A. Faenov, M. Tanaka, S. Tamotsu, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, T. Kaihori, and T. Kawachi: *Appl. Phys. A* **110** (2013) 179.
- 27) G. Norman, S. Starikov, V. Stegailov, V. Fortov, I. Skobelev, T. Pikuz, A. Faenov, S. Tamotsu, Y. Kato, M. Ishino, *et al.*: *J. Appl. Phys.* **112** (2012) 013104.

レーザーワード

アブレーション (ablation)

固体表面にレーザー光を集光照射し、固体表面の構成原子を爆発的に剥ぎ取ること。同様に、液体表面、液滴、クラスター、ガスなどに光やイオンを入射し、原子を爆発的に分解するアブレーションもある。特に、レーザー光によるアブレーションは、レーザーアブレーションと呼ばれる。レーザーアブレーションによりプラズマ

が生成され、そこから輻射される軟X線は、極端紫外リソグラフィや材料プロセスに有用である。アブレーション粒子は、高エネルギー状態で純粋なガス源として利用でき、成膜に応用されている。また、アブレーションによる材料の切断、穴開け、マーキングに応用されている。(牧村 哲也)