



講座

レーザーアブレーションの物理と応用

5. レーザーアブレーション応用の現状と今後の展開

岡田 龍雄, 杉岡 幸次¹⁾
(九州大学, ¹理化学研究所)

Applications of Laser Ablation - the State of the Art and Future Prospects

OKADA Tatsuo and SUGIOKA Koji¹⁾
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan
¹⁾*RIKEN, Wako 351-0198, Japan*
(Received 28 July 2003)

Abstract

Present status and future prospect of the application of laser ablation phenomena are reviewed, especially focused on the application to the synthesis of functional thin films and nanostructured materials, and to the laser micro-processing using femto-second lasers, hybrid laser processing and other novel methods.

Keywords:

Laser ablation, PLD, nano-particles, nano-structured materials, femto second laser processing, hybrid laser processing, LIPAA, direct writing, nano-processing

5.1 はじめに

レーザーアブレーションは固体あるいは液体（以下固体を代表的に用いる）の表面にレーザー光を照射したとき、プラズマの発生とともに固体表面の構成物質が爆発的に放出される現象である。たとえば、QスイッチNd:YAGレーザーやエキシマレーザーのようなナノ秒領域のパルス幅を持つレーザー光を、レンズで固体表面に集光照射すると、ごく一般的に観察される現象である。レーザーアブレーションには、プラズマの発生、衝撃波の発生、荷電粒子や原子分子、クラスターなどさまざまな粒子や光の放出など、いろいろな物理現象が伴う。このような現象を加工、医療、材料創製などへ応用しようという研究の端緒は、Qスイッチルビーレーザーが発明された、1960年代前半まで遡ることができる。40年が経過した現在、これらの応用研究の一部はすでに実用化されている。さらに、エキシマレーザーやフェムト秒

authors' e-mail: okada@ees.kyushu-u.ac.jp, ksugioka@postman.riken.jp

レーザーなど新しいレーザーの開発と装置技術の成熟に伴って、既存技術の高度化あるいは新しい応用分野の開拓など、レーザーアブレーションの応用研究はますます盛んになっている[1]。

Fig.1にレーザーアブレーションにともなう色々の物理現象とその代表的な応用例についてまとめた。このうちもっとも広く利用されているのは、レーザーアブレーションに伴って固体より放出される粒子を利用した材料創製と、粒子放出後に残る痕を利用した加工応用である。本稿でも、これらを中心に現状と今後の展望について述べる。

5.2 材料創製への応用

5.2.1 薄膜作製装置

薄膜作製装置の基本構成を Fig.2 に示す。装置は、アブレーション用レーザーと真空容器より構成される簡便

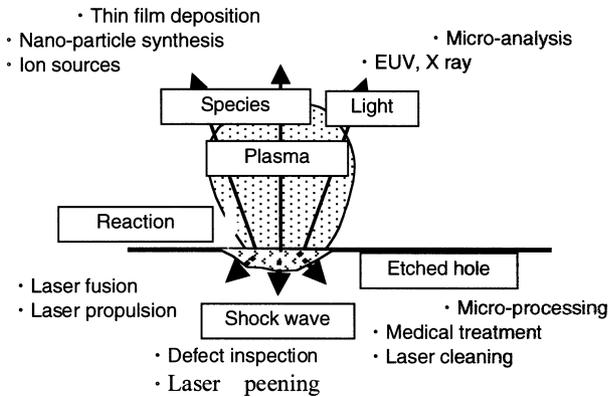


Fig. 1 Application of laser ablation.

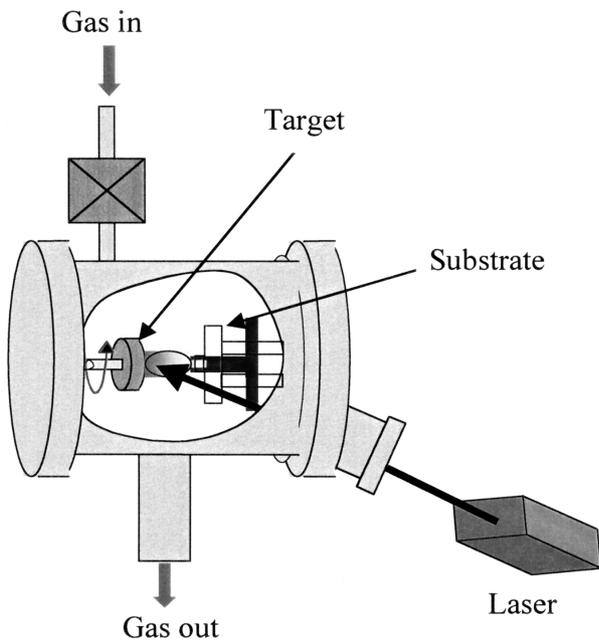


Fig. 2 Apparatus for pulsed laser deposition.

な構成となっている。真空容器内には、作製した薄膜と同一の組成を持つターゲットが設置されており、それと対向する数 10 mm の位置に加熱した基板ホルダーが設置されている。アブレーション用レーザーには、エキシマレーザーやQスイッチNd:YAGレーザーの高調波が広く用いられている。ターゲットは同一箇所がアブレーションされるのを防ぐため、通常は回転等の機構が設けられている。レーザーアブレーションによる薄膜作製は、一般には Pulsed-Laser Deposition (PLD) と呼ばれている [2]。高真空下で成膜を行う場合はレーザー蒸着あるいはレーザー MBE (Molecular Beam Epitaxy) などの語も用いられている。

レーザーアブレーションによる薄膜作製の特徴として次のような点がある。(1)ターゲットの組成とほぼ同一の組成を持つ薄膜を作製できる。(2)アブレーション放出粒子には熱蒸発と異なり数 eV を超える高速粒子が存在するので、成膜条件の低温化や非平衡結晶相の創生などが期待できる。(3)真空容器内にはターゲットと基板が有るだけの簡便で、クリーンな装置構成である。(4)材料の種類を選ばずターゲットの交換だけで種々の薄膜を作製できる。(5)レーザー光が透過できさえすれば、雰囲気ガスの圧力や種類を自由に選択できる。(6)レーザーパルスに同期して成膜が行われるので、成膜条件をデジタル的に制御できる。特に、(6)では、組成の異なる複数のターゲットと基板上での成膜箇所をレーザーパルスに同期して選択すれば、一度の成膜過程で組成の異なる複数の薄膜を効率よく作製できる。この方法は、コンビナトリウムレーザーアブレーションとして知られており、材料組成の最適化や新材料の探索等の材料開発研究の有力な手法として注目されている [3]。

一方、課題としては、大面積化とターゲットから発生するマイクロメートルサイズの微粒子(ドロプレットと呼ばれる)の除去がある。前者は、ターゲット上でのレーザー照射位置と基板を相対的に動かして、均一で大面積化が図られている。これまで5インチ程度の大面積化が報告されている。

5.2.2 機能性薄膜の作製

PLD による成膜は既に1960年代に報告されているが、実用的に注目されたのは1986年の高温超伝導体薄膜の作製に成功してからである [4]。以後さまざまな薄膜作製に应用されている。特に威力を発揮するのは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) などの高温超伝導体薄膜や $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ などの強誘電体薄膜などである。これらの材料はいずれも複数の元素を含む酸化物であり、組成の維持や酸化状態の制御が困難な材料である。先に述べたレーザーアブレーションの特色が発揮できる材料でもある。高温超伝導体薄膜については、SQUID (Superconducting QUantum Interference Devices) やマイクロ波デバイスへの応用などの実用化研究が進んでいる。Fig. 3 に PLD 法で作製した YBCO 膜を用いて試作された SQUID センサの写真を示す。また、超伝導電力線材の開発も進められている。

この他にも、Nd:YAl₅O₁₂ のようなレーザー媒質、ダイヤモンドライク薄膜などのコーティング材料、SiFe₂ などの新半導体材料などへの適用例が最近増加している。

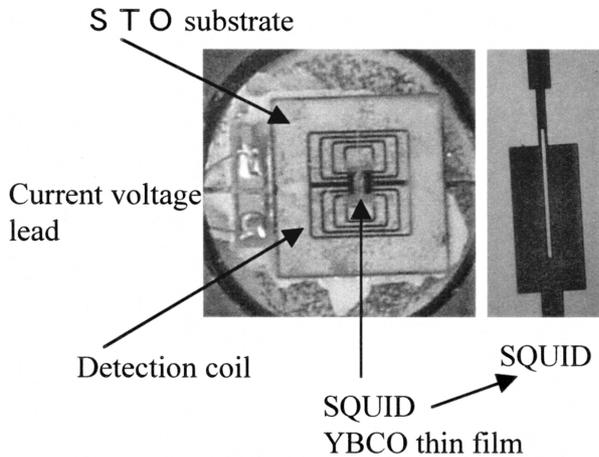


Fig. 3 SQUID sensor prepared on YBCO thin films deposited by PLD.
(Courtesy of Prof. K. Enpuku of Kyushu University)

5.2.3 ナノ構造体の創製

フラーレンがグラファイトをレーザーアブレーションしたときの生成物から発見されたことはよく知られている[5]. 一般に、アブレーションによりターゲットから直接放出された放出物の中には、原子や分子などに混じって、さまざまなサイズのクラスターやナノ粒子も存在している。しかし、その量は相対的には原子に比べて少ない。

一方、ガス雰囲気中でレーザーアブレーションを行うと、放出された原子や分子が凝縮してガス中で効率良く微粒子が生成される。Fig. 4は、この様子を可視化したもので、ブルーム内に発生するガス流に沿って微粒子が発生しているのが分かる[6]. このようにして発生した微

粒子を補修して電子顕微鏡で観察すると、大きさが数 nm の一次ナノ粒子が凝集した集合体であることが分かる。ナノ粒子の大きさは雰囲気ガスの圧力により制御できる。この場合も、ターゲットを交換するだけで、さまざまな種類のナノ粒子を容易に生成することができる。たとえば、シリコン (Si) を圧力が数 100 Pa のヘリウムなどの希ガス雰囲気中でレーザーアブレーションすると、大きさが 5 nm 程度の Si ナノ結晶微粒子を作製できる。バルクでは発光しない Si もナノ粒子では発光することが知られており、実際にアブレーションで生成した Si ナノ粒子を用いた発光素子が作製されている[7]. 今後、光電子デバイスへの応用が期待される。

ガス中でナノ粒子を生成した際の問題点は、ガス中や捕集時にナノ粒子同士が凝集してしまうことである。ナノ粒子は反応性が強く凝集した微粒子を再分離するのは容易でない。これに対して、界面活性剤を混入した水中に置いたターゲットを直接アブレーションすると、水中に分散したナノ粒子を作製することができる。Fig. 5 は、このようにして作製した、銀ナノ粒子の写真である[8]. 金属以外でも、同様の手法でいろいろの微粒子作製に応用され始めている。

ナノワイヤー、ナノチューブといったナノ構造体もレーザーアブレーションにより作製可能である。Co などの遷移金属を含有した炭素ターゲットを 1,000 度程度に加熱した 50 kPa 程度の Ar ガス中でアブレーションを行うと、さまざまな形態のカーボンナノチューブを作製できる[9]. 金属が触媒となって、いわゆる気液固相 (vapor-liquid-solid) 反応により、ナノチューブが合成されると考えられている。同様に、Si, GaN などの半

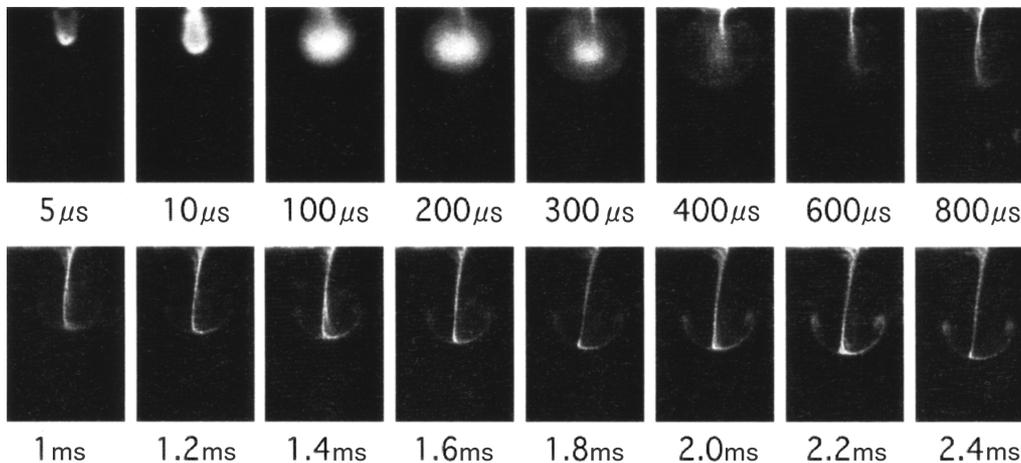


Fig. 4 Dynamics of nanoparticle formation process in YBCO laser ablation plume.

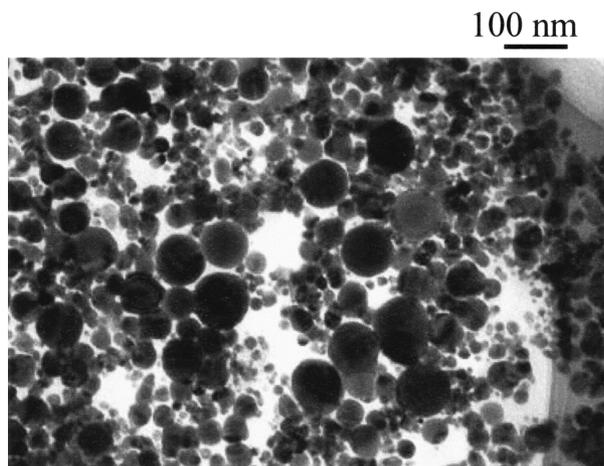


Fig. 5 Silver nanoparticles synthesized by laser ablation in water.
(Courtesy of Prof. M. Tsuji of Kyushu University)

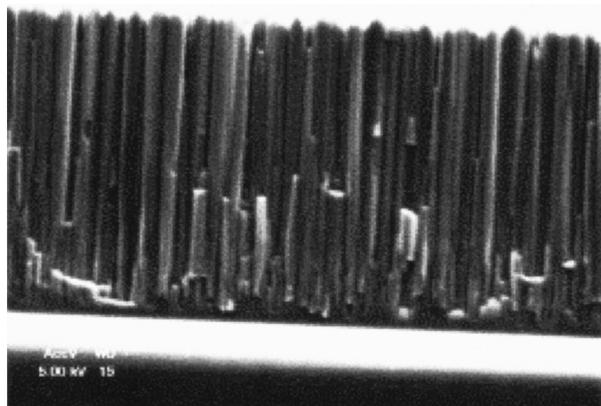


Fig. 6 ZnO nanorods synthesized by nanoparticle assisted laser ablation.

導体ナノワイヤーが作製されている[10]。一方、最近われわれは、アブレーションで生成したナノ微粒子を原料にして、Fig. 6 に示すような ZnO ナノロッドの合成に成功した[11,12]。ZnO ナノワイヤーやナノロッドからはレーザー発振も確認されており、ナノ光電子デバイスへの展開が期待される。

5.2.4 今後の展望

レーザーアブレーションによる材料合成は、近年研究報告が急増している。このことは、レーザーアブレーション法が新材料開発や新材料による素子の試作のための研究手段として、広く普及しつつあることを示している。このような材料研究への応用の観点から、レーザーアブレーション法の今後の展開として次の点を挙げたい。すなわち、上で紹介した、水中アブレーションのよ

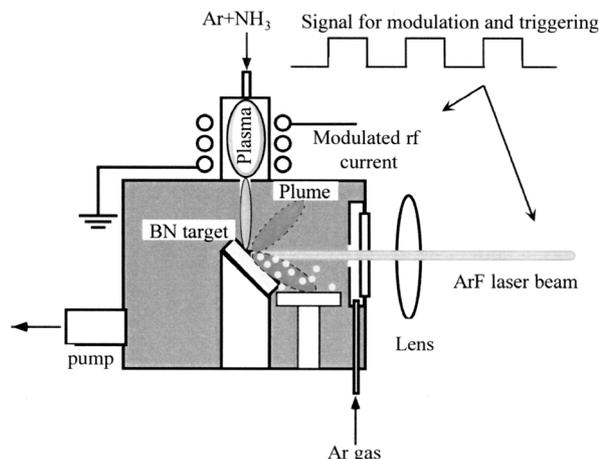


Fig. 7 Plasma packets assisted PLD.
(Courtesy of Dr. S. Komatsu of National Institute for Materials Science, Japan)

うな通常と異なる雰囲気での材料作製である。従来材料合成では利用されていない、さまざまな環境が考えられる。そのような環境としては、何もパッシブな環境である必要はない。イオンビームやプラズマ等のプロセスと組み合わせた、複合レーザーアブレーションプロセスもその一例である。Fig. 7は、プラズマの照射とレーザーアブレーションを組み合わせた BN 薄膜作製法の例である[13]。両者を併用したときのみ、発光機能を持つ BN を合成できており[14]、新材料の開発手段としての展開が期待される。

一方、実用的デバイス作製への応用に関しては、一部には高温超伝導デバイスのように製品化に应用されているものもあるが、材料作製の研究報告数の急増に見合うほどの普及には至っていない。その中で、材料合成以外では、レーザーアブレーションを利用した直接描画プロセスがある。一つは、あらかじめ薄膜を堆積した透明基板(ドナー基板)を通してレーザー光を照射し、アブレーションを利用して薄膜を飛散させ近接しておいた基板(アクセプター基板)上に堆積させるものである。ドナー基板とアクセプター基板をレーザー照射ごとに動かせば、プリンターのようにさまざまなパターンを直接描画できる。材料は金属やセラミックスを問わないので、これを用いてキャパシタや抵抗などを含む回路パターン直接描画した例が報告されている[15]。他の例としては、レーザーアブレーションで生成したナノ微粒子を微細なガスノズルから噴射して、基板上に回路パターンを直接描画する例も報告されている[16]。Fig. 8 に作製例を示す。これらは、それ自体を製品生産に適用するには課題

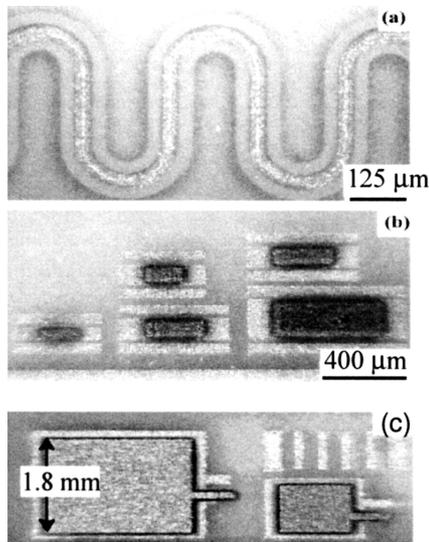


Fig. 8 Examples of electric circuit directly written by laser-induced forward transfer of thin films. (Courtesy of Dr A. Pique of Naval Research Lab.)

が多いが、レーザープロトタイプリングの一種として、試作品の研究開発への応用が期待される。

5.3 アブレーションによる材料加工

5.3.1 アブレーション加工の現状

レーザーアブレーションでは、高エネルギーの中性粒子、ラジカル、イオンが固体材料から放出されプラズマを形成するが、前述のように放出された種は機能性薄膜の成長や超微粒子の生成に利用される。一方、アブレーション後の固体表面にはエッチング溝が形成される。この現象は固体材料の直接加工に応用されている。

赤外レーザーによる材料の加熱・蒸発現象も広義にレーザーアブレーションととらえるならば、重工業分野における大出力の炭酸ガスレーザー(波長 $10.6 \mu\text{m}$)を用いた金属(鉄鋼)板の穴明けや切断は、最も普及している応用の一つである。一方エレクトロニクス分野では、携帯電話用プリント基板の穴明けが大きな市場となっている。その他レーザーアブレーションは、Si ウェハや IC パッケージのマーキング、フォトリソグラフィや IC 回路の修正、ハイブリッド IC の抵抗トリミング、インクジェットプリンターノズルの穴明け等広く利用されている[17]。これらのうちの多くは、赤外の Nd:YAG レーザー(波長 $1.06 \mu\text{m}$)が用いられている。

材料をより精密かつ微細に加工しようとした時、加工部周辺に極力熱影響を与えないようにしなくてはならな

い。そのためには、波長が短く、かつパルス幅も短いレーザーを用いることが望ましい。波長が短くなればなるほど材料に対する吸収係数は増加し、加工領域に効率良くエネルギーを注入できる。逆に吸収係数が小さい場合、レーザー光は材料内部深くまで侵入し、加工されなかった領域でもエネルギーが吸収され加工部周辺に熱影響を与える。また波長が短くなれば光子エネルギーも大きくなるため、固体内の原子や分子の光解離現象を誘起でき、非熱的加工を実現することができる。一方レーザーを照射した時の熱拡散長 D は $D = (\kappa \cdot t)^{1/2}$ のオーダーである。したがってパルス幅が短くなると D も短くなり、加工部周辺への熱影響も少なくなる。ここで κ は材料の熱拡散係数、 t はパルス幅である。

上記のような理由で、今日微細加工を行うには紫外のナノ秒パルスレーザーであるエキシマレーザーが主に用いられている。Fig. 9に、エキシマレーザーアブレーションによってポリマーの微細加工を行った例を示す[18]。この技術を、MEMS(Micro-electro-mechanical System)やマイクロセンサーなどの作成に応用することが期待されている。

5.3.2 次世代アブレーション加工

上述のように今日レーザーアブレーションは多様な材料の加工に利用されている。一方製品の高性能化・高機能化のためには、新機能材料や高機能材料の開発およびその加工技術の確立が重要となっている。これらの材料はその高機能が災いして一般的に加工が困難であり、既存のレーザーアブレーション技術では良好な加工特性が得られない。したがってこのような難加工材料の加工技術の確立が、将来へ向けての重要な課題となっている。この問題を解決するために、大きく分けて2つのアプローチがなされている。一つは新しいレーザーを用いること、もう一つは既存のレーザーを用いプロセスの工夫によってこれまでできなかった加工を実現しようとするものである。

新しいレーザーとしては、現在フェムト秒レーザーと F_2 レーザー(波長 157 nm)の利用が検討されている。金属をレーザーで加工しようとした場合、レーザーエネルギーは自由電子で吸収され熱に変換される。ナノ秒オーダーのパルスレーザーでは、発生した熱がパルス照射中に金属内部を伝導し比較的大きな溶融層を形成するため、加工部周辺の盛り上がりや熱歪みによる損傷が生じ、高品質な加工は行えない。一方フェムト秒レーザーを用いると、パルス幅が電子・フォノン結合時間よりも短いため、金属内部への熱伝導による損失過程を無視で

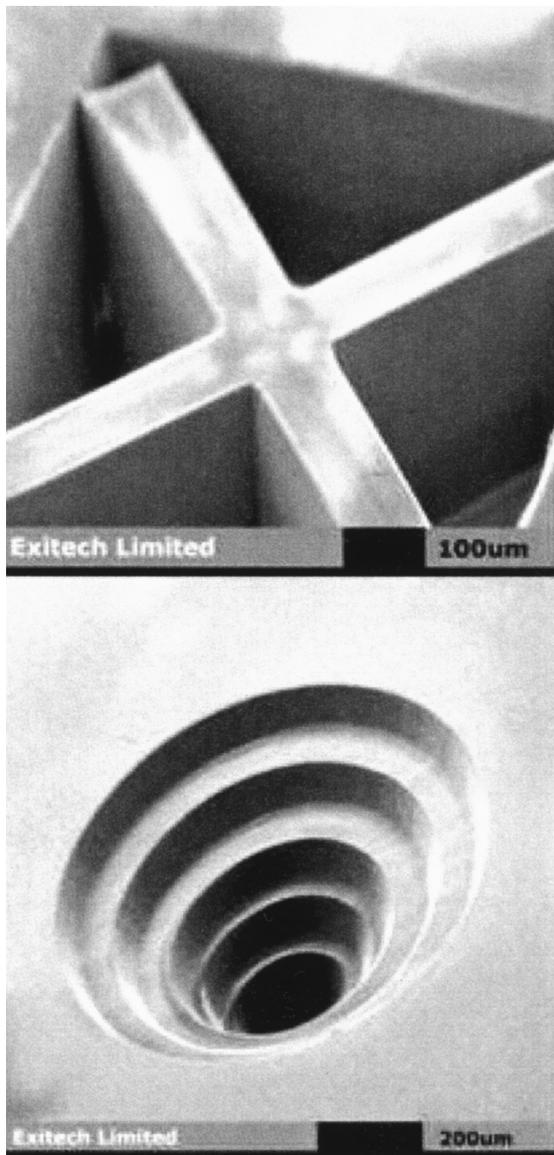
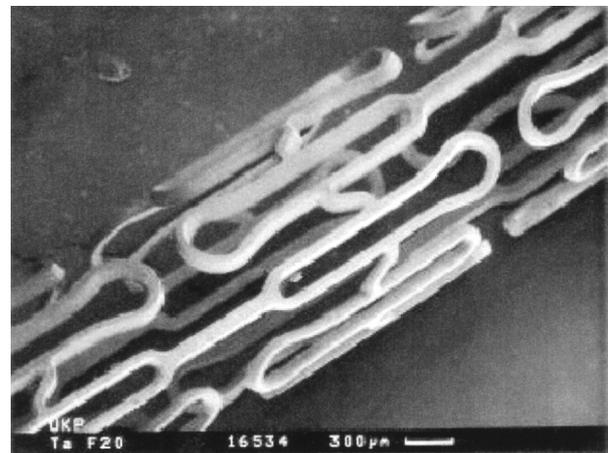
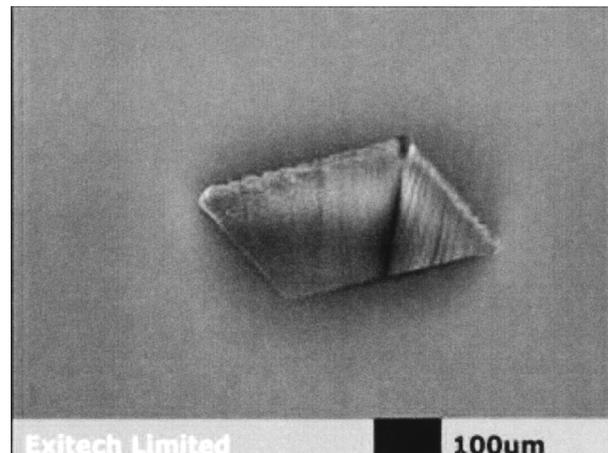


Fig. 9 Micromachining of polymer by excimer laser ablation.

きる。その結果、レーザーエネルギーを格子系に効率良く注入できるとともに、加工部周辺への熱影響を排除でき、高品質な加工が実現できる。また強度の大きいフェムト秒レーザーを用いると、ガラスなどの透明材料に対しても束縛電子が複数の光子を同時に吸収する多光子吸収が起こり、アブレーションを生じさせることができる。これによって透明誘電体材料の表面加工、マイクロマシーニング、穴開けなどの研究が行われている。多光子吸収はレーザー強度に大きく依存するため、適当な強度のガウスビームを用いるとビームの中心部分のみ多光子吸収を誘起でき、回折限界以下の微細加工も行える。



(a)



(b)

Fig. 10 Micromachining by femtosecond laser ablation.

Fig. 10 にフェムト秒レーザーによって金属 [a] [19] および石英ガラス [b] [20] をアブレーション加工した例を示す。

フェムト秒レーザーを用いると、アブレーション過程においてプラズマシールドを回避できる利点もある。すなわちレーザーアブレーションで材料の加工を行う場合、アブレーションによって生成されたプラズマに、入射レーザー光が吸収されることが多々問題となる。一番の問題点は、レーザーパルスの後半部分がプラズマに吸収されるため、投入エネルギーのすべてを加工に利用できず、効率が悪い点である。実験的にプラズマの膨張する速度は 10^6 cm/s 程度と見積られ、1 ps 以下の極短パルスレーザーを用いれば、このプラズマ膨張による照射レーザーエネルギーの吸収による損失を回避できる。

もう一つの新しいレーザーは真空紫外光を発する F_2 レーザーである。 F_2 レーザーはナノ秒パルスのレーザーであるが、光子エネルギーが極めて大きい(7.9 eV)ためほとんどの材料に対して大きい吸収係数を持つ。吸収係数が大きいことは良好な加工を行う上で非常に重要な要因である。また大きい光子エネルギーを利用して、固体を構成する原子や分子の結合を光解離することができ、その結果非熱的な加工を実現できる。これらの特長を利用して、テフロン(PTFE)や石英ガラスに高品質な加工が実現されている[21]。 F_2 レーザーのもう一つの利点は、その短波長性を利用して非常に高い空間解像度が得られる点である。アブレーション加工では200~300 nm程度の空間解像度が期待されている。

フェムト秒レーザーや F_2 レーザーは高品質かつ超微細なアブレーション加工を提供するが、現状では安定性、信頼性、フォトンコスト、光学系等に問題があり、即座に産業に利用できる状況にない。既存の紫外あるいは可視のレーザー光で難加工材料の高品質加工や超微細加工が実現できるなら、産業応用上その利点は大きい。この実現のためにはプロセス自体を工夫する必要があり、複合レーザープロセスが提案されている。複合レーザープロセスとは、既存のレーザープロセスに、別のビームプロセスや特殊ツール、媒質を組み合わせたプロセスである。例えば異なる波長あるいは異なるパルス幅のレーザー、電子ビーム、イオンビーム、プラズマなどを既存のレーザープロセスに導入することが考えられる。その概念図をFig. 11に示す。以下にいくつかの複合レーザープロセスを紹介する。

真空紫外-紫外多重波長励起プロセスでは、真空紫外レーザー光と紫外レーザー光が同時に試料に照射される[22, 23]。本プロセスの加工メカニズムをFig. 12に示す。まず真空紫外レーザー光の光子によって電子が価電子帯から伝導帯あるいは伝導帯の下にある欠陥準位に励起される。多くの透明材料(誘電体)において電子親和力は紫外レーザーの光子エネルギーより小さいため、同時に照射した紫外レーザー光は励起された電子に吸収され、励起電子をさらに真空準位上に引き上げる。その結果光解離や光イオン化が生じ、さらに十分な紫外レーザー光のエネルギーが投入されていればアブレーションへと進展する。このプロセスでは真空紫外レーザー光は電子の励起のみに利用されるため、照射強度が真空紫外レーザーのみでアブレーション加工する場合の1/5~1/10程度でよい。 F_2 レーザーとKrFエキシマレーザーを組み合わせた多重波長励起プロセスによって石英ガラスを加工

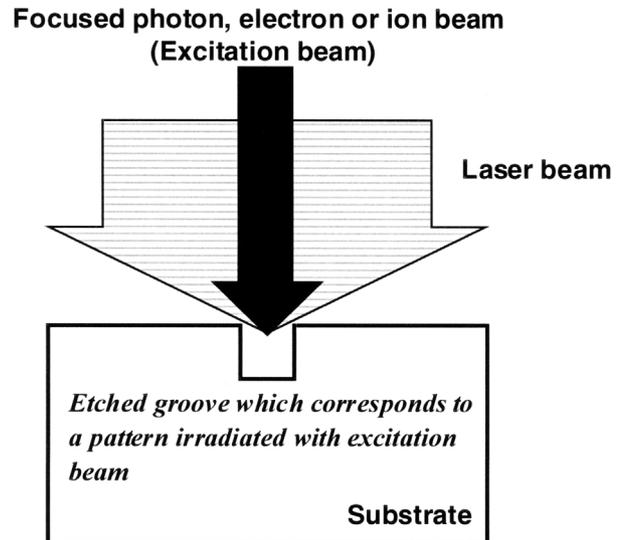


Fig. 11 Schematic illustration of concept of hybrid laser processing.

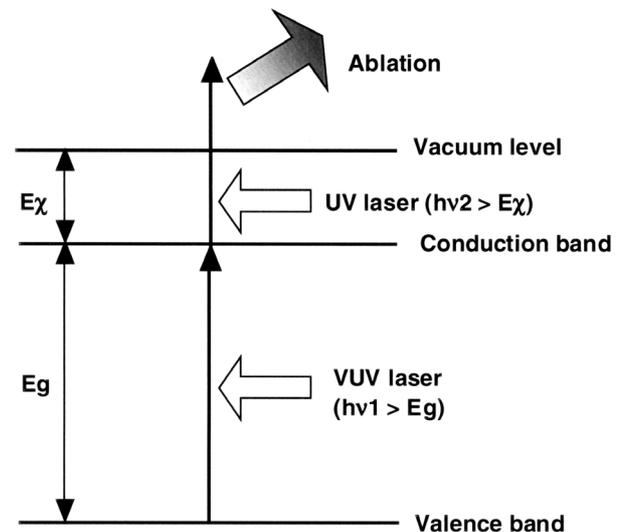


Fig. 12 Mechanism of VUV-UV multi-wavelength excitation process.

した場合、 F_2 レーザーアブレーションの場合とほぼ同等の加工品質が実現されている。

レーザー生成プラズマ支援アブレーション(Laser-Induced Plasma-Assisted Ablation: LIPAA [24])の概略図をFig. 13に示す。この場合、用いるレーザーの波長が加工対象材料に対して透明であることが必要である。また加工対象材料に対してレーザー光を照射する側と反対側に、固体ターゲット(主に金属)を配置してある。このようにしてレーザー光を試料に照射すると、レーザー

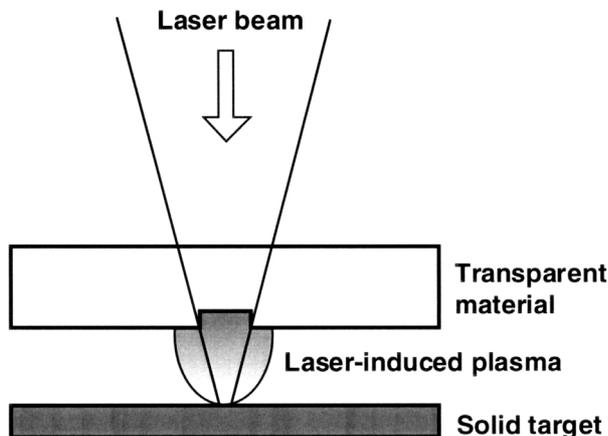


Fig. 13 Schematic illustration of scheme of LIPAA process.

光は試料に吸収がないため透過する．透過したレーザー光は，試料の後方に配置された固体ターゲットに吸収され，アブレーションが生じる．その結果プラズマが生成され，このプラズマとレーザー光が相互作用することによって試料裏面がアブレーション加工される．ここで重要なことは，レーザー生成プラズマはあくまでアブレーションを支援するだけで，これのみによってエッチングは生じない．すなわち実際のアブレーションはレーザー光によって生じているため，加工パターンはレーザー光の照射パターンに一致する．本手法によって各種ガラス材料の表面微細パターン加工や高品質マーキングを行うことができる[25]．本プロセスにおいては，これまでの実験結果からプラズマ中の電子が重要な役割を担っていることが明らかになってきた．プラズマ中の電子がアブレーションにどのように寄与しているかは未だ不明であるが，基板との電荷交換あるいは運動エネルギーの移譲による基板の励起の可能性が考えられる．その結果，入射レーザー光に強い吸収が生じ，アブレーションが起こる．またプラズマによる基板表面の加熱の可能性もあるが，詳細は今後の研究課題である．

一方特殊ツールとして石英ガラス製の微小球（直径 $5 \pm 0.25 \mu\text{m}$ ）を用いると，そのマイクロレンズ効果によってアブレーションによるナノ加工が行える．Fig. 14に，微小球をPET薄膜表面近傍に規則的に配置し，KrFエキシマレーザー（248 nm）を照射することによって加工されたPET薄膜のAFM像を示す．加工痕1つの半値幅は約600 nm，深さは約200～300 nm程度であり，規則的な加工パターンが得られている[26]．

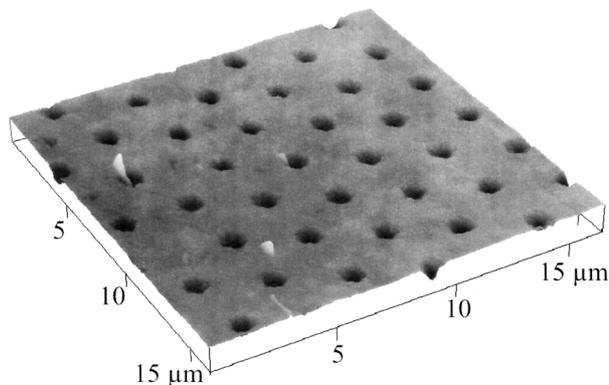


Fig. 14 AFM image of PET surface nano-structured by laser ablation using micro spheres made of fused silica.

5.4 まとめ

高機能材料や新機能材料の合成や精密微細加工技術の開発は，産業界からの要請も強く，今日広く研究が行われている．レーザーアブレーションは，放出された高エネルギーの原子，ラジカル，イオンを利用して多様な機能材料を合成するのに適した手法であり，かつ新物質の創製も期待される．またアブレーションされた領域がエッチングされる現象は，各種材料の微細加工に応用できる．

ポリマーのレーザーアブレーションという現象が1980年代初頭に報告され，その後多様な材料にアブレーションが試みられてきた．1990年以降は，その応用研究も年々活発になってきている．さらに1990年後半にはフェムト秒レーザーやF₂レーザーといった新しいレーザーも利用できるようになり，研究はますます盛んになっている．21世紀に入り現在では想像もできないような高度なレーザーや新しい手法が開発される可能性も大いにあり，レーザーアブレーション応用技術が今後さらに発展することが期待される．

参考文献

- [1] “レーザーアブレーションとその応用”，電気学会レーザーアブレーションとその産業応用調査専門委員会編，コロナ社（1999年）．
- [2] D.B. Chrisey and G.K. Hubler ed., *Pulsed Laser Deposition of Thin Films*, Jhon Wiley & Sons, Inc. (1994).
- [3] 川崎雅司，牧野哲征，瀬川勇三郎，鯉沼秀臣：“コンピナトリアル酸化亜鉛超格子研究”，応用物理 70, 523 (2001).
- [4] D. Dijkkamp, T. Venkatesan, X. Wu, S.A. Shaheen, N. Jisrawi, Y. H. Minlee, W. L. Mclean and M. Croft, Appl.

- Phys. Lett. 51, 619 (1987).
- [5] H.W. Kroto, J.R. Hearth, S.C.O. Brien, R.F. Curl and R. E. Smalley, Nature 318, 162 (1985).
- [6] T. Okada :“ Laser-aided imaging diagnostics of laser ablation plume”, *Lasers in Materials Science*, ed. R.P. Agarwala (Trans Tech Publications, 1999) p.95.
- [7] T. Yoshida, N. Suzuki, T. Makino and Y. Yamada, Technical Digest of the International Electron Devices Meeting 2001, pp.175-178, (Washington, 2001).
- [8] T. Tsuji, K. Iryou, Y. Nishimura, and M. Tsuji, J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 145, 201 (2001).
- [9] F. Kokai, K. Takahashi, M. Yudasaka and S. Iijima, J. Phys. D33, 545 (2000).
- [10] Y.F. Zhang, Y.H. Tang, N. Wang, D.P. Yu, C.S. Lee, I. Bello and S.T. Lee, Appl. Phys. Lett. 72, 1835 (1998).
- [11] M. Kawakami, A.B. Hartanto, Y. Nakata and T. Okada, Jpn. J. Appl. Phys. 42, L33 (2003).
- [12] A.B. Hartanto, N. Xu, Y. Nakata and T. Okada, Appl. Phys. A (2003) to be published.
- [13] 小松正二郎, 清水禎樹, 守吉佑介, 岡田勝行, 三友護 : 応用物理 71, 443 (2002).
- [14] S. Komatsu, K. Kurashima, H. Kanda, K. Okada, M. Mitomo, Y. Moriyoshi, Y. Shimuzu, M. Shiratani, T. Nakano and S. Samukawa, Appl. Phys. Lett. 81, 4547 (2002).
- [15] D. Chrisey, A. Pique, J. Fitz-Gerald, B. Ringeisen and R. Mohdi, Laser Focus World, 113 (2000).
- [16] E. Ozawa, Y. Kawakami, T. Yoshida, M. Iwashina and K. Takahashi, SPIE Proc. 4830, 232 (2002).
- [17] K. Washio, SPIE. Proc. 3618, 230 (1999).
- [18] <http://www.exitech.co.uk/>
- [19] H.K. Tönshoff, A. Ostendorf, S. Nolte, F. Korte and T. Bauer, SPIE Proc. 4088, 136 (2000).
- [20] H. Endert, M. Kauf, E.E. Mayer, M.J. Scaggs, J.H. Fair and D. Basting, SPIE Proc. 3618, 413 (1999).
- [21] K. Sugioka, S. Wada, H. Tashiro, K. Toyoda, Y. Ohnuma and A. Nakamura, Appl. Phys. Lett. 67(19), 2789 (1995).
- [22] K. Obata, K. Sugioka, T. Akane, N. Aoki, K. Toyoda and K. Midorikawa, Appl. Phys. A73(6), 755 (2001).
- [23] J. Zhang, K. Sugioka and K. Midorikawa, Opt. Lett. 23 (18), 1486 (1998).
- [24] M.H. Hong, K. Sugioka, D.J. Wu, L.L. Wang, Y.F. Lu, K. Midorikawa, and T.C. Chong, SPIE Proc. Vol. 4595, 138 (2001).
- [25] R. Denk, K. Piglmayer and D. Bäuerle, Appl. Phys. A74 (6), 825 (2002).



おか たつお
岡田 龍雄

1974年九州大学工学部電子工学科卒業 .
1979年同博士課程退学後 , 九州大学大学院
総合理工学研究科助手 . 最近は , レーザ
アブレーションプラズマを利用した , EUV
光源の開発 , ナノ構造材料の作製 , その作製プロセスのレー
ザー分光計測などを行っている . 長崎で「久保田」を飲む会会
員 .



すぎおか こうじ
杉岡 幸次

1984年早稲田大学理工学部電子通信学科
卒 . 1986年同大学大学院理工学研究科電気
工学専攻修士課程修了 . 同年理化学研究所
入所 . 現在同研究所レーザー物理工学研究
室専任研究員 . 東京理科大学および東京電機大学客員助教
授 , 日本女子大学非常勤講師兼務 . 工学博士 . 理研入所以来
短波長 , 短パルスレーザーを用いた物質のマイクロプロセシ
ングの研究に従事 . 応用物理学会 , 電気学会 , レーザー学会 ,
レーザー加工学会 , SPIE 会員 . 本文中でも紹介した LIPAA
プロセス加工機を最近丸文^(株)と共同で製品化 . 早く 1 台売れ
ることを願っている .