

機能的レーザー加工技術の開発 と産業応用に関する研究

Performance Technology of Laser Material Processing and its Industrial Applications

内田悦行*1, 古橋秀夫*1, 山田 諄*2, 内田敬久*3, 劉 京南*4,

V. T. Chitnis*5, 秦野和郎*2, 比嘉俊太郎*6, 植田明照*7, 稲垣慎二*8

Yoshiyuki UCHIDA, Hideo FURUHASHI, Jun YAMADA, Yoshihisa UCHIDA, Jing-Nan LIU,
Vijay T. CHITNIS, Kazuo HATANNO, Shuntaro HIGA, Akiteru UEDA and Shinji INAGAKI

Abstract The purpose of this study is to develop a new functional technology of laser material processing and to find its industrial applications. Some creative methods and results are reported, related to construction of an excimer laser material processing system, design and production of advanced materials, including excimer laser material processing. A clear explanation of the processing mechanism and new industrial applications are also reported. A material processing system using an excimer laser was constructed. Precise automatic alignment technique using differential moire signals was developed for this system. Ceramic-based superconducting thin films were produced by a magnetron sputtering system for advanced material. Ceramic-based functionally graded materials of thick blocks were produced by a progressive lamination method using a solid-fluid separation technique. Nonlinear optical crystal with epitaxial growth was produced by molecular beam epitaxy, and optical second and third harmonic generations were observed. A digital image processing system with a streak camera was constructed for a clear explanation of the ablation mechanism. Experimental optimization of the parameter relative to cutting, drilling and surface treatment was made. Three dimension stereolithography was constructed with photo-curable materials by laser holography. A creative method for a functionally integrated hybrid element processed by laser was found. It can be conclude that there is a fair chance for new industrial applications.

1. はじめに

技術社会をエンジニアリングから展望すると、コンピュータネットワークによる高度情報化の波と共

に技術の機能化の波が押し寄せて来ているように見える。情報化が従来の工学の全学問領域にわたって横断的に進められたと同じように、機能化も工学の全学問領域にわたって追求される工学的技術課題である。本研究のねらいは、レーザー加工を機能化の研

*1 愛知工業大学情報通信工学科 (豊田市)

*2 愛知工業大学電子工学科 (豊田市)

*3 愛知工業大学大学院電気・材料工学専攻 (豊田市)

*4 東南大学自動制御系 (中国, 南京市)

*5 Length Standard Section, National Physical Laboratory

(New Delhi, India)

*6 愛知工業大学建築学科 (豊田市)

*7 愛知工業大学電気工学科 (豊田市)

*8 愛知工業大学応用化学科 (豊田市)

究テーマとして、複数の学問領域の研究者がそれぞれの専門領域の技術的手法から取り組み、お互いに異質な研究手法や異なる発想に触れ、触発活性化され、新たな創造的発想を生み出し、機能化の次世代技術シーズを追求することにある。また、研究体制の国際化によって、異文化をもとにした多様な発想に触れることもねらっている。さらに本研究には、ものづくりハードウェア技術とコンピュータソフトウェア技術とを統合融合したシステム化技術が含まれる。専攻や学科を異にする大学院生や卒業研究生に、基礎工学の総合的修得、多様化に対応する思考、創造的発想を生み出す環境を提供することをねらっている。

研究の目的は、機能化を追求したレーザ精密微細加工技法を開発することである。そのために、紫外線エキシマレーザによるフォトアブレーション(光化学的な物質除去)機構の解明と加工の良質化を実現する。

レーザ加工分野におけるエキシマレーザによるフォトアブレーション機構の解明は、まだ定性的な議論が開始されたばかりである[1]。高速ストリークカメラを用いて実験データを集積することは、この機構を解明する有力な手段となる。紫外線エキシマレーザは、その高い光子エネルギー、数十ナノ秒という狭いパルス幅、制御性の良いパワー、速い繰り返し周波数などにより、非熱光化学反応にもとづく高分子の分子切断、ならびに熱助勢光化学反応によるセラミックスの分解を実現する。すなわち、精密で微細な加工を実現する。この先端的レーザマイクロプロセッシング技術は、従来の赤外線レーザによる熱加工すなわち重加工に対して、光化学反応にもとづく機能性軽加工の新技術として、先進機能性材料に対する新産業創生の基盤技術になるといえる。

本報告では、エキシマレーザ加工システムの構築、先進機能性材料の設計製作、エキシマレーザによる加工とアブレーション加工機構の解明、レーザ加工による先進機能性材料の新産業創生、の順に研究の手法ならびに技法に重点をおいて、機能性レーザ加工の総合報告と展望をまとめる。

2. エキシマレーザ加工システムの構築

システムの光学要素と機械要素、コンピュータ制

御のためのインターフェイスならびにプログラムソフト、などを設計製作し、加工システムを構築した。試料位置決めの高精度化に関する回折モアレセンシング制御技法を開発した。レーザシステムの基本特性を蓄積した。

2.1 エキシマレーザ加工システム

エキシマレーザビームによる直接加工システムの構成を、図1に示す[2]。レーザ光は集光レンズで絞られ試料に照射される。試料の加工位置は、XYZステージで制御される。使用エキシマレーザの特性は、レーザ媒質XeCl、波長308nm、パルスエネルギー最大500mJ、繰り返し周波数最大50Hz、レーザパルスの半値幅30ns、発振ビームサイズ11mmx24mmの長方形である。

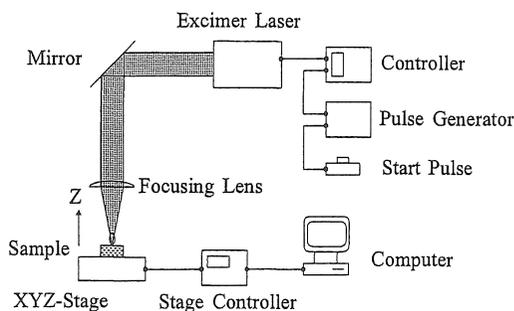


図1. エキシマレーザ加工システム

試料加工面におけるレーザビーム径は、金箔に開けられた穴の形状から簡易に測ることができる。精密な横方向強度分布は、エッジ法により計測される[2]。レンズ焦点距離100mmにおけるビーム径は、短径0.11mm長径0.24mmである。

レーザエネルギーを利用した加工方法には、レーザビームをレンズで集光して加工する方法の他に、パターンマスクを用い等倍あるいは縮小して加工する方法がある。一方、感光材を使い露光後にエッチングするレジスト加工は、超微細加工を必要とする大規模半導体集積回路の製造リソグラフィ工程に使われている。高集積化によりパターン線幅の微細化が進むと、光の回折限界により短波長の光源が必要となる。

半導体記憶素子の集積度の開発競争は3年で4倍の速さで進められている。水銀灯のI線からSOR線源のX線へ移行する間に、紫外線レーザの利用が従

来の光技術の延長として採用されている。

2.2 エキシマレーザの短波長化

エキサイテッドダイマ (エキシマ) はレーザ発振に適した反転分布特性を示す。希ガス単体あるいはハロゲンガスとの混合ガスで作られる。組み合わせと発光波長の関係を表1に示す。

表1. エキシマの発光波長

	Diatomc Molecule	F	Cl	Br	I
Diatomc Molecule		157	258	291	341
Ne	108				
Ar	126	193	175	161	
Kr	146	248	222	207	191
Xe	172	351	308	282	253

放電励起 ArFエキシマレーザ装置を試作した。電気回路を含む装置設計の検討と分光学的実験結果をもとにして、エネルギー効率を求めた。約12%である。シミュレーション精度の向上と効率の向上を図っている[3-5]。

レーザの光子エネルギーは、発振波長と図2に示す関係がある。セラミックスのバンドギャップエネルギーを同時に示す。光子エネルギーを物質の分解エネルギーに一致させれば、共鳴効果により効率のよい加工が可能となる[6]。短波長化による高エネルギーの利用、ならびに発振波長の連続化によるエネルギーレベルの制御性に対するニーズは大きい。

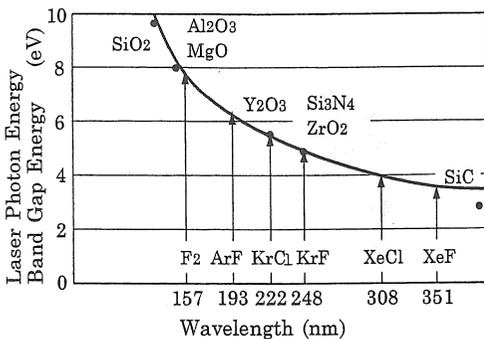


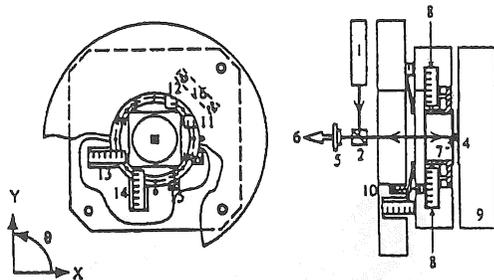
図2. エキシマレーザの発振波長に対する光子エネルギー

2.3 ステージの位置制御

試料の深さ縦方向の加工にはレーザ強度フルエンスあるいはパルス数が影響するが、横方向の加工にはビームポイントの位置決め精度が問題となる。大規模半導体リソグラフィ工程に用いられるマスクアライナの位置決め技術に、高精度のモアレ技法が開発されている[7]。平行配置した2枚の回折格子に光を垂直に当てると、モアレ縞という直線格子の縞方向に垂直方向の相対変位に対して、正弦波類似の光強度分布が得られる。この信号を位置決め制御信号として用いる。エレクトロニクスの技術向上により電気信号の安定度が高まり、位置変位に対して信号の変化率が高い高感度域を利用することを可能とした。この方法に、差動信号処理技術を組み合わせ、高精度位置決めを実現した。

実験には、光源として波長633nmのHe-Neレーザ、回折格子としてピッチ25μmの直線格子を使用した。回折格子は、間隙を1.0mmとして平行に配置した。180度位相シフトした正弦波形が、2組の回折格子の適正配置により得られる。両信号の差信号はS字特性を示す。コンピュータ信号処理により、制御のオン、オフとステージの移動方向が決められる。

この差動信号を得る方法は、原理的に間隙変位に影響されない高精度を実現する方法である。最小移動量7.8nmのパルスステージを使用したベンチテストで使用機器の限界値±4.0nmの位置決め精度を実現した。最小移動量のさらに細かいステージを選ぶことにより、精度の向上が期待される[8]。



- 1:He-Ne laser, 2:Beam splitter, 3:First quadruple grating, 4:Second quadruple grating, 5:Quadruple photo-detector, 6:to microcomputer through A/D converter, 7:X-Y-θ stage, 8:from PZT driver, 9:Rough stage, 10:Wire spring, 11-14:PZT, 15:Compressive spring, 16:Connection spring

図3. 電歪ピエゾ素子駆動の試作アライナ

図3に、試作したXY平面ならびに間隙制御の電歪ピエゾ素子駆動のプロトタイプのアライナを示す。

差動制御信号の作成に、ハードウェアとソフトウェアの最適設計がはかられている[9]。ここに用いられるモアレ技術は、パターン幅の異なるハイブリッドの位置決めを利用できる。粗動用と微動用にピッチの異なる回折格子を選べば、広範囲を高精度で位置決めする全自動化が実現する[10]。

さらにこの技術は、角度変位に対しても適用され、ナノラジアンの高精度位置決めを実現した[11-12]。直線方向と組み合わせると平面XY Θ の位置決めを実現する。

3. 先進機能性材料の設計製作

イットリウム系セラミックス超電導薄膜を、高周波マグネトロンスパッタリング法で作製した。セラミックス-金属系傾斜機能材料を、固液分離工学の手法を導入した段階的添加法により作製した。組成傾斜層設計エキスパートシステムの構築の可能性を見出した。有機バナジルフタロシアニン光非線形単結晶を分子線蒸着法で作製し、配向配列ならびに成長機構を解明し、結晶の大型化を実現した。

3.1 セラミックス超電導薄膜の作製

イットリウム系超電導パルクは、YBaCuが123組成比でペブロスカイト構造である。実験では、分子量を計算して原材料を秤量する。酸素雰囲気中焼成で酸素分子の吸着を促進させ、超電導性を持たす。薄膜は焼成粉体をターゲットとしてMgO基板上にマグネトロンスパッタリングで作製する。MgO結晶格子定数とのマッチングによりエピタキシー成長を実現している。スパッタ条件で生成薄膜組成比が

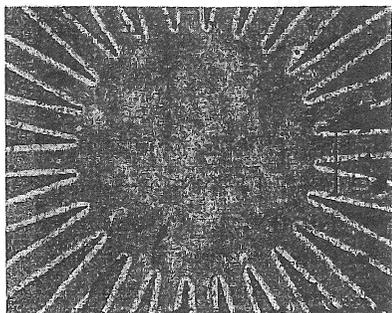


図4. 超電導薄膜のリソグラフィ加工例

変わるが、低温作製をねらいとして123組成比のターゲットを用い、123組成比の薄膜を実現している[13]。粒界接合によるジョセフソン素子や、パターン配線への利用をレーザ加工で実現する。

図4に、レーザ溶射超電導薄膜へのリソグラフィ加工のテスト例を示す。マスクパターンをコンタクト露光した。濃リン酸のエッチングを5分すると、50 μ m幅が33 μ mとなった。最適化はまだである。

3.2 セラミックス-金属系傾斜機能材料の作製

異種材料を接合する際に、両材料の組成比を連続的に変えた組成傾斜機能材料を用いると、接合をスムーズにすることができる。直接接着剤で張り合わせた材料に比べて、熱応力などの影響を少なくすることができる。

厚手のセラミックス系傾斜機能材料を作製する方法として、固液分離工学の手法を導入した段階的添加法が提案されている。原材料の組成比を段階的に変え積層濾過する。得られたケーキを圧搾し焼成する。濾過と圧密で層の境界を入り組ませ連続組成を実現した[14-15]。

カオリンと酸化第二鉄の粉体を原材料として傾斜機能材料を作製した。実験条件の一例を示す。カオリン($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)は粒径5 μ m以下に粉砕する。酸化第二鉄(Fe_2O_3)は粒径1 μ m以下に調整されている。各層77g重量比一定で10層に組成分割する。水に混ぜ、排気速度120 l/minで真空吸引濾過する。ケーキの圧搾圧力3.6kg/cm²で24hr操作する。ブタン70%プロパン30%の混合ガス炉を用い、4時間で1040 $^{\circ}$ Cに昇温焼成する。900 $^{\circ}$ Cからは空気を遮断して還元する。直径60mmのピストンを用いた。酸化第二鉄からマグネタイト(Fe_3O_4)への還元が観察された。

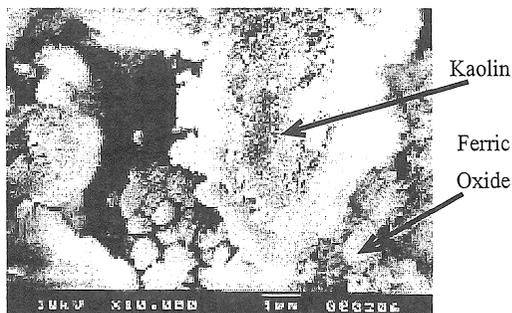


図5. カオリン-鉄混合層の走査型電子顕微鏡写真

図5に、カオリン-鉄焼成傾斜機能材料の走査型電子顕微鏡写真の一例を示す。粉体を水に混ぜて濾過すると、帯電電位を下げ、高密度化が期待できる。実験結果では、カオリンと鉄粒子は混ざっているが、空隙穴も観察された。原材料の粒径、焼結温度特性、収縮率などを適正に設定することにより、反りや剥離のない連続的な傾斜機能材料が作製できた[16]。

電気的特性は、原材料の混合比率、焼成温度で変わる[17]。各層の誘電率特性から全誘電率を計算し、電界緩和特性を持った傾斜機能材料を設計することができる[18]。材料設計エキスパートシステムの構築を可能としている。組成が傾斜し2次加工が困難な材料に対して、レーザ加工は、新たな産業応用の道を開くといえる。

3.3 光非線形単結晶の作製

光コンピュータ素子用として、分子線エピタキシャル装置で熱安定性に優れた有機バナジルフタロシアン光非線形単結晶((C₈H₄N₂)₄VO)の作製を試みた[19-21]。走査型電子顕微鏡により、微結晶からの大きな単結晶への成長過程が観察された。図6に、KBr基板上に成長している様子を示す。相構造が調べられ[22]、熱処理を施すことにより形状12.5 μm x 12.5 μm x 0.16 μmの大型単結晶が作製できた。試作したメーカフリッジ測定装置で三次光非線形特性を測定した。三次非線形感受率χ⁽³⁾として高い値13x10⁻¹⁰esuが得られた[21-23]。波長1064nmのYAGレーザによる第3高調波(波長355nm)が観察された。結晶の大型化とレーザ加工により、スイッチング特性など素子化への実験が実現する。

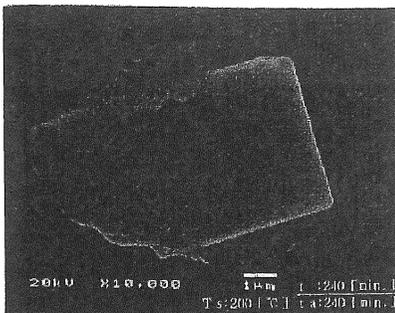


図6. バナジルフタロシアン単結晶の走査型電子顕微鏡写真

4. エキシマレーザによる加工とアブレーション

加工機構の解明

レーザアブレーション機構の解明とレーザ切断・穴加工および表面改質に関わる加工パラメータの最適化実験を試みた。ストリークカメラを用いたデジタル画像処理システムを構築した。

4.1 先進機能性材料のアブレーション実験

アブレーション計測システムを図7に示す[24]。レーザを試料に照射すると、アブレーション波として発光柱ブルームが生成される。この発光柱を高速ストリークカメラで観察する。レーザパルス波形に対して、ストリークカメラのタイミングを設定し、時間軸に対して発光柱の光強度を画像計測する。光が光路30cmを進む時間10⁻⁹sを問題とする実験である。

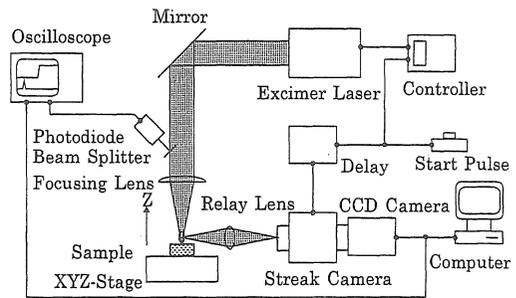


図7. アブレーション計測システム

図8に、アブレーションブルーム観察像の一例を示す。発光柱の試料表面からの高ささと発光柱の強度の関係が、時間軸(15nsステップ)に対して示している。試料はカオリン-鉄傾斜機能材料の重量組成比50%層である。レーザフルエンスは1kJ/cm²である。

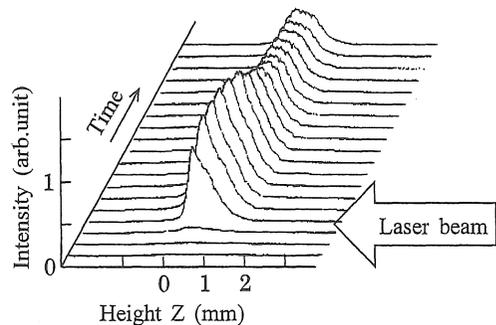


図8. アブレーションブルーム像の観察結果

カメラのスリットをレーザー光軸方向に平行配置し, レーザビームの短軸方向から計測した。発光柱の強度境界は最大強度の1/eレベルを表示した。

また, 発光柱強度の時間空間特性を図9に示す。レーザーパルス幅が30nsと狭いので, 生成発光柱ブームにより照射レーザー光が吸収されず, 効率よく加工される特性を示している。カオリン-鉄傾斜機能材料から生成するアブレーション波の初速度は, 組成比が変わっても 10ms^{-2} オーダーとほぼ一定である。発光柱は数 μs 後に消滅しているため, 繰り返しパルスの影響は少ないといえる。

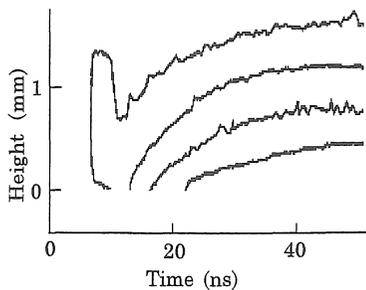


図9. アブレーションブームの時間空間特性

4.2 先進機能性材料のレーザー加工

カオリン-鉄傾斜機能材料のレーザー加工深さ特性の一例を, 図10に示す。レーザーフルエンスは $1\text{kJ}/\text{cm}^2$ である。パルス数に対する加工深さ特性は, 比例関係から飽和傾向を示す。

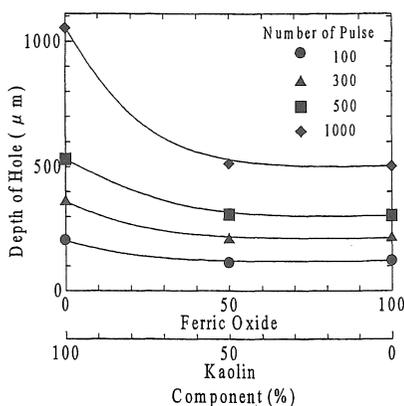


図10. カオリン-鉄傾斜機能材料のレーザー加工深さ特性

レーザーエネルギーが物質分解に直接使用されるか, 熱エネルギーへの変換過程を伴って使用されるかに

より, 加工効率ならびに加工精度が決まる。レーザー照射表面を走査型電子顕微鏡ならびに画像顕微鏡で調べた。デブリーの付着残留量は粗さ計により測った。カオリン層の光化学反応によるシャープな加工特性, 鉄層の熱エネルギー変換による熔融特性, な

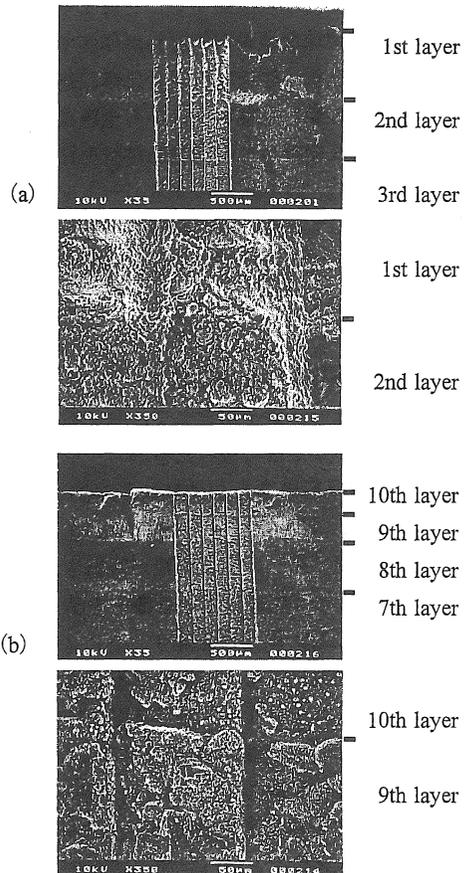


図11. レーザビームでスキャン加工したカオリン-鉄傾斜機能材料の走査型電子顕微鏡写真 (a) カオリンリッチ層 (b) 鉄リッチ層

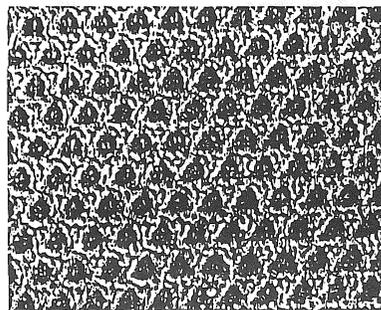


図12. パターン加工したYBaCuO系超電導薄膜の走査型電子顕微鏡写真

らびに両特性の混ざった中間混合層の加工特性が観察された[25-26]。

波長の異なるレーザーによる加工特性の比較をする。レーザービームで直接走査した試料表面の走査型電子顕微鏡写真を、図11に示す[27]。波長248nmのKrFエキシマレーザーのビームを6分割し、カオリン-鉄傾斜機能材料の傾斜面上を走査した。フルエンスは $6\text{J}/\text{cm}^2$ である。波長308nmのXeClエキシマレーザーによる加工と同じく、表面の改質状況、鉄層での熔融状況が拡大図から観察された。

超電導薄膜のパターン加工の一例を、図12に写真で示す[13]。試料は、MgO基板上にマグネトロンスパッタリングで作製した膜厚60nmのYBaCu系超電導薄膜である。マスクパターンの1/10縮小投影系を用いて、波長248nmのKrFエキシマレーザーを1パルスフルエンス $6.4\text{J}/\text{cm}^2$ で加工した。パターン構造 $10\mu\text{m}$ 以下が実現している。

5. レーザ加工による先進機能性材料の新産業創生

光硬化性樹脂を用いてレーザーホログラムにより、造形加工を実現した。レーザー加工による先進機能性材料の新産業創生の可能性を展望する。

5.1 三次元立体レーザー光造形

光硬化性樹脂にレーザービームを照射すると樹脂が硬化する。加工層を順次積層すると立体構造の造形が可能となる。微粉体のレーザー焼結によっても立体造形プロトタイプングが可能である。

画像入力あるいはコンピュータデータ入力により三次元物体をレーザーホログラムに記録し、ステレオグラムで実像を再生する。実像位置でレーザー光造形加工が可能となる。

フレネルホログラム共役再生像で造形した貝の写真の一例を、ホログラム再生像とともに図13に示す[28]。ホログラムの記録には、光源として出力50mW、波長633nmのHe-Neレーザーを、記録乾板にはAGFA GEVAERT 10E75を使用した。光造形には、出力40mW、波長488nmのAr⁺レーザーを用いた。感光性樹脂には、ラジカル重合反応機構をもつアロニックス2官能特殊アクリレート(M-210)、単官能オリゴエステルアクリレート(M-5700)、ベースレジンのTO-458を配合した。光硬化開始剤には、カン

ファーキノンを使用した。共役再生像の光子エネルギー密度を、 $0.05\text{mW}/\text{mm}^2$ とすると、積層硬化法による全体の硬化作業時間は130分となった。

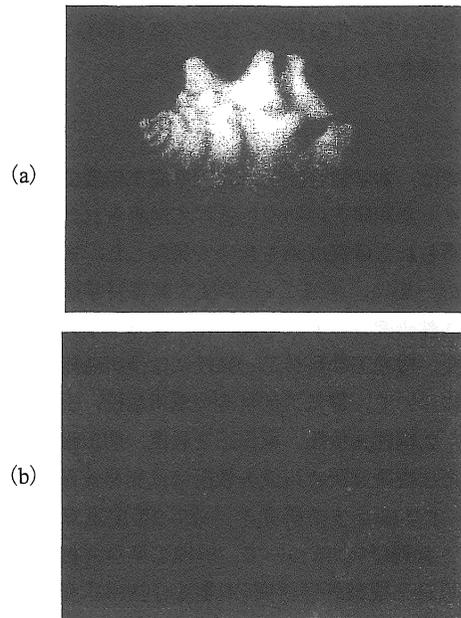


図13. フレネルホログラム共役再生像による貝のレーザー造形 (a) ホログラム再生像(虚像) (b) 造形写真

5.2 三次元立体ハイブリッド集積機能素子

情報化社会においては、ソフトウェアの開発と共に、高速で多量の情報を処理するコンピュータのハードウェアの開発が待たれている。機能性レーザー加工技術により、半導体電子素子の高密度集積化による超微細加工、高速超電導ジョセフソン素子の接合部形成加工、空間並列処理を実現する光コンピュータの光非線形素子加工、さらに三次元立体ハイブリッド化による高分子とセラミックスや金属の傾斜機能材料による基板集積化が実現性を帯びる。

これらの新産業創生には、先進機能性材料の開発と、位置決め技術を含むレーザー加工技術の開発が、基盤技術として待たれるところである。

6. おわりに

レーザー加工を機能化の研究テーマとして、複数の学問領域の研究者がそれぞれの専門領域の技術的手法から取り組み、機能化の次世代技術シーズを追求

することができた。研究論文を広く学際領域にも発表し、立体ハイブリッド集積機能化など創造的手法を見出すことができた。また、ものづくりハードウェア技術とコンピュータソフトウェア技術とを統合融合したシステム化技術を、工学の複合領域に対して総合的視点でとらえることができた。

謝辞

本研究は、本学総合技術研究所平成7年度公募プロジェクト共同研究の助成を受けて進められた。その後得られた研究成果も含めて報告した。また、本研究の一部に、平成7~8年度文部省科学研究費補助金基盤研究Bの助成を受けた。電気工学科渡辺茂男教授、機械工学科林二一教授には傾斜機能材料の研究について、電気工学科落合鎮康教授、小嶋憲三教授、大橋朝夫教授、家田正之教授、前田昭徳講師、総合技術研究所吉川俊夫教授には光非線形材料の研究(本学総合技術研究所平成7~9年度重点プロジェクト共同研究)について、機械工学科井村徹教授には材料の観察評価研究(本学総合技術研究所平成7~9年度重点プロジェクト共同研究)について、電気工学科鳥井昭宏講師には位置決めの研究について、基礎教育系自然科学教室の高木淳講師には超電導材料の研究について、それぞれ共同で成果を得た。大学院生、卒研生には、実験研究で協力を得た。さらに、成果論文を共同で発表した学内外の共著者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 内田, 山田, 渡辺, 内田, 「傾斜機能材料のエキシマレーザ生成アブレーションプルームの時間空間分解特性」, レーザー学会誌レーザー研究, Vol.26, No.11, pp.816-820(1998)
- 2) 内田, 山田, 渡辺, 林, 内田, 「鉄-カオリン傾斜機能材料のエキシマレーザ加工に関する研究」, 愛知工業大学研究報告, Vol.32B, pp.23-30(1997)
- 3) S. Nagai, H. Furuhashi, Y. Uchida, J. Yamada, A. Kono and T. Goto, "Formation dynamics of excited atoms in an ArF laser using He and Ne buffer gases", Journal of Applied Physics, Vol.77, No.7, pp.2906-2911(1995)
- 4) S. Nagai, M. Sakai, H. Furuhashi, A. Kono, T. Goto and Y. Uchida, "Effects of F Ions and F₂ Molecules on the Oscillation Process of a Discharge-Pumped ArF Excimer Laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vo.,34, No.1, pp.40-46(1998)
- 5) H. Furuhashi, J. Yamada and Y. Uchida, "Theoretical studies on energy loss processes in a discharge-pumped ArF excimer laser", Optics and Optoelectronics, Theory, Devices and Applications, Edited by O. P. Nijhawan et al., (Narosa Publishing House, New Delhi), Vo.1, pp.316-320(1998)
- 6) Y. Uchida, J. Yamada, S. Higa, Y. P. Kathuria, A. Tsuboi, S. Watanabe, N. Hayashi, H. Furuhashi and Y. Uchida, "Precision Micro-Material Processing by Excimer Laser Ablation", Photonics-96, Edited by J. P. Raina, (Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi), Vol.1, pp.71-76(1996)
- 7) 劉, 古橋, 植田, 山田, 内田, 「回折モアレ光を用いた超精密位置決め技法とその精度」, 電気学会論文誌, Vol.116-C, No.1, pp.75-80(1996)
- 8) 周, 劉, 古橋, 内田, 「レーザを用いたリソグラフィ用マスクアライナの開発」, 愛知工業大学研究報告, Vol.33B, pp.171-176(1998)
- 9) L. Zhou, J. Liu, H. Uchida, K. Hatano and Y. Uchida, "Precision Alignment System using Laser Moire Sensors", Proceedings of the 2nd China-Japan Symposium on Mechatronics, pp.193-198(1997)
- 10) A. K. Kanjilal, R. Narain, R. Sharma, V. T. Chitnis, B. P. Singh, J. Liu, J. Yamada and Y. Uchida, "Automatic Mask Alignment without a Microscope", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.44, No.3, pp.806-809(1995)
- 11) J. Liu, H. Furuhashi, A. Torii, R. Sharma, V.T. Chitnis, B. P. Singh, J. Yamada and Y. Uchida, "Automatic mask alignment in the Θ direction using moire sensors", Journal of Nanotechnology, Vol.6, No.4, pp.135-138(1995)
- 12) A. Torii, L. Zhou, J. Liu, H. Furuhashi, A. Ueda, Y. Uchida and V. T. Chitnis, "Automatic Angular Positioning using Moire Signals", Advances in Information Strage System, ASME, (in press)
- 13) Y. Uchida, J. Yamada, A. Tsuboi, S. Ochiai and Y. Uchida, "Micro Material Processing by Excimer Laser Ablation", Proceedings of the 2nd China-Japan Symposium on Mechatronics, pp.275-279(1997)

- 14) N. Hayashi, Y. Murakami, S. Watanabe, Y. Uchida, T. Imura, D. Dykes, G. Touchard and M. Shirato, "Development of Functionally Gradient Materials", Proceedings of the Thailand-Japan Joint Conference on Solid-Fluid Separation Technology, pp.10-14(1997)
- 15) N. Hayashi, K. Taka, S. Watanabe, T. Ishikura, Y. Uchida, S. Higa, D. Dykes, P.-L. Fung, K. Azuma and M. Shirato, "Production of Functionally Graded Materials by Means of Expression Operation", Journal of Fluid Machinery, Vol.25, No.10, pp.198-203 (1997)
- 16) Y. Uchida, J. Yamada, H. Furuhashi, S. Watanabe, N. Hayashi, S. Higa and Y. Uchida, "Excimer Laser Processing of Ceramic-Based Functionally Graded Materials", Functionally Graded Materials 98, (Elsevier Science B. V.), (in press)
- 17) S. Watanabe, T. Ishikura, Y. Hobo, Z. Wu, N. Hayashi, Y. Uchida, D. Dykes and G. Touchard, "The Electrical Properties of Functional Graded Materials Manufactured by a Filtration Method", Journal of Fluid Machinery, Vol.25, No.10, pp.204-206(1997)
- 18) S. Watanabe, Y. Hobo, T. Ishikura, K. Takai, N. Hayashi, Y. Uchida, D. Dykes, G. Touchard and M. Ieda, "Use of Functionally Graded Material in the Manufacture of a Variable-permittivity Type Insulator, and the Effect an Electric Field Relaxation", Proceedings of the 10th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH'97, Vol.2, pp.141-144(1997)
- 19) 長田, 加藤, 前田, 古橋, 落合, 大橋, 小嶋, 内田, 家田, 「バナジルフタロシアニン蒸着薄膜の作製と構造評価」, 日本真空協会誌真空, Vol.38, No.7, pp.660-662(1995)
- 20) 前田, 古橋, 吉川, 内田, 小嶋, 大橋, 落合, 家田, 水谷, 「分子線エピタキシー法でKBr, 雲母基板上に作製したバナジルフタロシアニン単結晶膜の評価」, 電気学会論文誌, Vol.118-A, No.5, pp.464-474(1998)
- 21) A. Maeda, N. Okumura, H. Furuhashi, T. Yoshikawa, Y. Uchida, K. Kojima, A. Ohashi, S. Ochiai, M. Ieda and T. Mizutani, "Third Harmonic Generation and Growth Mechanism of Vanadyl-Phthalocyanine Single Crystal Prepared on KBr Substrate by Molecular Beam Epitaxy", Journal of Crystal Growth, (in press)
- 22) 前田, 川上, 朱, 古橋, 吉川, 落合, 内田, 小嶋, 大橋, 家田, 水谷, 「分子線エピタキシー法でガラス基板上に作製されたバナジルフタロシアニン薄膜の相構造変化に伴う熱刺激電流」, 日本真空協会誌真空, Vol.41, No.6, pp.569-573(1998)
- 23) 前田, 奥村, 古橋, 吉川, 内田, 小嶋, 大橋, 落合, 家田, 水谷, 「MBE法によりKBr基板上に作製されたバナジルフタロシアニン単結晶とそのSHGとTHG」, 電子情報通信学会誌, (印刷中)
- 24) Y. Uchida, J. Yamada, H. Furuhashi and Y. Uchida, "Characteristic Properties of Ablation Plasma Plumes from Materials Produced by an Excimer Laser", Reports of the Institute of Fluid Science, Tohoku University, Vol.10, pp.203-208(1997)
- 25) Y. Uchida, J. Yamada, S. Watanabe, N. Hayashi, H. Furuhashi, Y. Uchida, Y. P. Kathuria and G. Touchard, "Behaviour of Ablation Wave from Functionally Graded Materials by Excimer Laser", Journal of Electrostatics, Vol.40 & 41, pp.741-746(1997)
- 26) Y. Uchida, J. Yamada, N. Hayashi, S. Watanabe, H. Furuhashi and Y. Uchida, "Characteristics of Laser Ablation Processing for Metal-Ceramic Compound Materials", Journal of Fluid Machinery, Vol.25, No.10, pp.390-394(1997)
- 27) Y. Uchida, J. Yamada, Y. P. Kathuria, N. Hayashi, S. Watanabe, S. Higa, H. Furuhashi and Y. Uchida, "Excimer Laser Processing of Functionally Graded Materials", Functionally Graded Materials 1996, Edited by I. Shiota et al., (Elsevier Science B. V.), pp.337-342(1997)
- 28) 服部, 竹尾, 八木, 内田, 「ホログラムの実像再生を利用した光造形」, レーザー学会誌レーザー研究, Vol.24, No.4, pp.486-490(1996)

[連絡著者] 内田悦行 e-mail: uchiday@in.aitech.ac.jp
<http://www.aitech.ac.jp/~uchida>
 (受理 平成11年3月20日)