

短パルス UV レーザによる結晶加工の基礎検討

龍見 雅美*・上野 誠**・小西 圭介**・綿谷 研一***

LASER PROCESSING ON SINGLE CRYSTALS BY UV PULSE LASER

Masami Tatsumi, Makoto Ueno, Keisuke Konishi and Kenichi Watatani

Laser processing by using of UV pulsed laser was carried out on polyimide, acrylic resin, sapphire and diamond in order to understand the fundamental laser processing. The shapes of holes drilled on the surface of the samples by the UV laser are discussed as being related to the laser beam profile. The laser was irradiated on the surface of the each sample under conditions of both several position apart from the position of minimum laser beam diameter and several shots.

1. はじめに

近年 Laser Processing は切断、穴開け、溶接、焼き入れ等レーザ加工として多くの生産現場で実用化されているだけでなく、材料や部品（デバイス）の改質や特性向上あるいはレーザアブレーションによる薄膜形成糖新材料/新デバイスの創製等研究開発においても多用されている¹⁾。Laser Processing は多岐にわたる加工をあらゆる種類の材料について非接触で行うことが可能であり、光学系の制御により加工の自動化が容易で加工形状に対する制約が少なく高速・高効率な加工が可能である。しかしながら Laser Processing もレーザ光と被加工物である材料との相互作用の結果であるから高精度・高品質な加工や新規なプロセスの開発のためにはその材料物性を基にしたメカニズムの解明が不可欠^{2,3)}と考えられる。本研究では Laser Processing による微細加工/改質を目指して、まず通常のレーザ加工における現象論的な検討を行うべく加工条件の基礎検討を実施した。

2. レーザ加工

固体にレーザ光が照射されるとレーザ光の波長あるいはパワー密度（光電界強度）に応じて1光子や多光子吸収あるいは電子のプラズマ振動による逆制動放射により電子系に貯えられたエネルギーはピコ秒オーダーでフォノン系に伝達され格子振動エネルギーが増加し物質のレーザ光照射領域の温度が上昇する。この熱はレーザ光のパルス幅と物質の熱拡散係数 ($D_F = K_T / \rho C_p$ K_T : 熱伝導率、 ρ : 密度、 C_p : 定圧熱容量) に依存して拡散してゆく。この熱拡散と周囲気体との熱伝導・対流及び輻射で決まる散逸する熱量とレーザ光パワーとのバランスで熱平衡状態の温度が決まる。

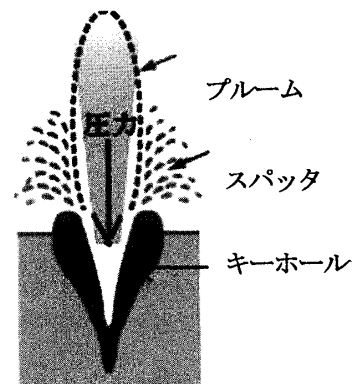


図1. レーザ加工プロセス

* 電気電子工学科 ** 電気電子工学科学生 *** 住友電気工業(株)

さらにレーザー光のエネルギーが供給されると温度上昇が続き物質の融解・気化（蒸発）が始まる（アブレーション加工）。溶融部は表面からの蒸発の反力で窪み、表面張力とのバランスで決まる図1のようなキーホールと呼ばれる深い穴が形成され加工が進行する。ここで蒸発した気体によりブルームと呼ばれる蒸発気体密度の高い領域ができる。この領域にレーザーが照射されるとプラズマ化しプラズマブルームが生成し、そのプラズマ振動数とレーザー光の周波数が一致すると共鳴吸収が起こり、振動数が非常に高い場合はプラズマ表面でレーザー光は吸収されシールドイングされ、プラズマによる熱加工プロセスが寄与し始める。紫外域の短波長レーザーを照射すると分子内の化学結合を直接切断することができ、熱的な影響を少なくすることができるが励起状態から非輻射遷移による基底状態への緩和過程による熱的な影響を考慮する必要がある。いずれにしても励起された原子種を有効に系外に除去することにより熱的な影響を小さくできると考えられる。

このようなプロセスでレーザー加工を行う場合加工目的に合わせてまずレーザー光の波長、パワー、パルス幅を選択することが必要である。さらにレーザー光のビーム径やプロファイル、焦点位置⁴⁾（ビームウエスト）等のビーム特性と加工特性の関係を把握しておくことも重要である。

3. 実験

加工実験にはレーザー光源は紫外線短パルスレーザー（Coherent社 AVIA 355-7000、波長：355nm、平均出力：7W、パルス幅：35ns、ビーム径(1/e²):3.5mm、ビーム拡がり角：<0.3mrad）を用いた。レーザー光の照射位置およびショット数制御にはガルバノメータユニット（GSI社 HC/3, Silloptics社 Telecentric Scan Lense f:80mm 搭載）を用いた。図2にレーザー加工の実験系を示す。図3はこの実験系のUVレーザーの出射端で計測したパルスエネルギーの励起用半導体レーザー電流比及びパルス繰り返し周波数依存性である。加工に用いた試料は標準試料としてポリイミド（東レ・デュポン製 カプトン H₁V 125μm厚）とアクリル（住友化学製 SUMIPEX 2.1mm厚）を使用し、単結晶材料としてサファイア（(0001)面、0.5mm厚）と人工合成ダイヤモンド（Type I b, (001)面、1.0mm厚）を用いた。

ガルバノメータユニット透過後のレーザービームの拡がり角及びビームウエスト位置を市販のレーザーアライメントペーパーのレーザー照射位置をレーザー光の光路に沿って相対的（zで表示）に変化させその加工痕から測定した。レーザー光照射条件は（パルスエネルギー 0.24μJ, 繰り返し周波数 25 kHz）で行い、1ショットの加工痕直径のz依存性より求めた。図4に加工痕直径のz依存性を示す。この曲線の接線および極小

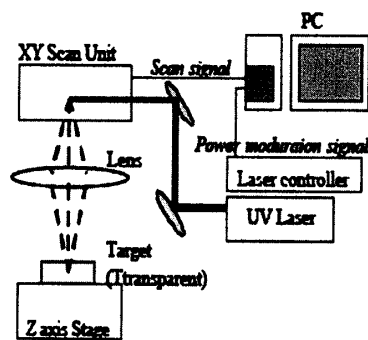


図2. レーザ加工実験系

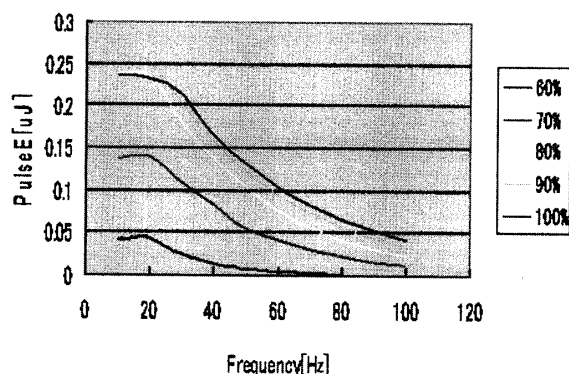


図3. パルスエネルギーの繰り返し周波数依存性

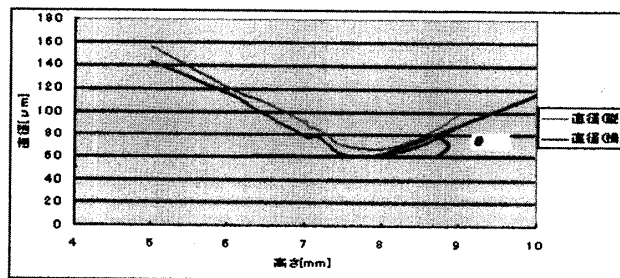
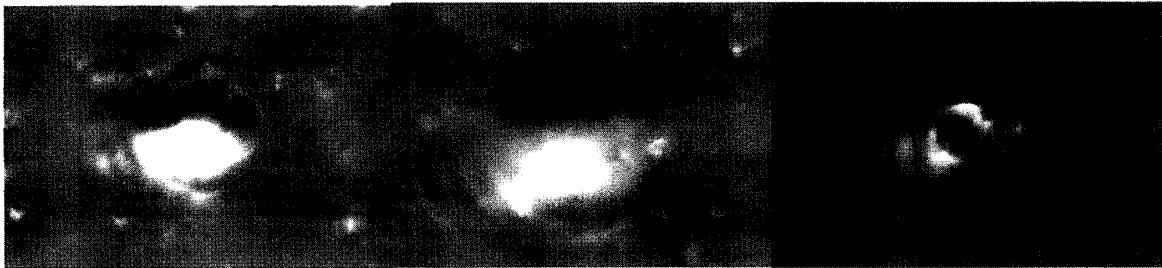


図4. 加工痕直径のz依存性

値より加工領域近傍でのレーザ光の拡がり角（全角）：27mrad、ビームウエスト位置： $z = 7.8\text{mm}$ (相対位置)が得られた。なお加工痕の最小径は約 $60\ \mu\text{m}$ であった。

実験試料の加工についてもレーザ光照射はビーム拡がり角測定と同一条件（パルスエネルギー $0.24\ \mu\text{J}$, 繰り返し周波数 $25\ \text{kHz}$ ）で行った。加工位置をビームウエスト位置に対して相対的に変化させ、ガルバノメータユニットで 35ns 幅パルスのショット数を $1\sim 10$ まで、位置を $300\sim 500\ \mu\text{m}$ ずつ移動させて加工を行った。加工痕は光学顕微鏡及び非接触三次元測定装置（三鷹光器 NH-3SP）で評価した。

4. 結果と考察



$z=8.5\text{mm}$

$z=9.1\text{mm}$

$z=9.7\text{mm}$

図5. ポリイミドの加工痕

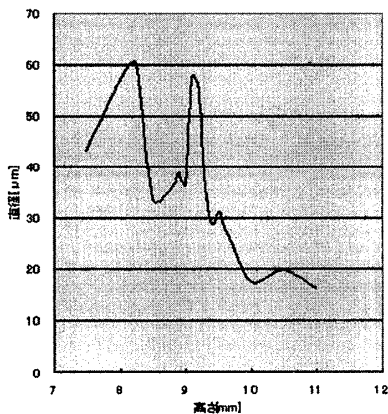


図6. ポリイミドの加工痕
直径の z 依存性

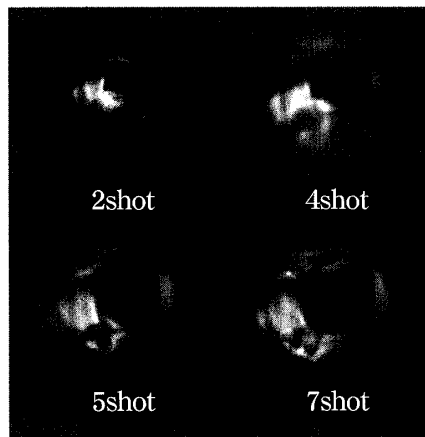


図7. ポリイミドの加工直径の shot 数依存性

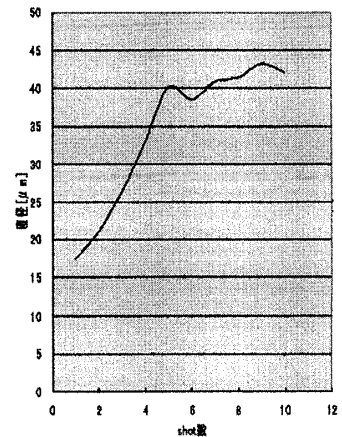


図5にポリイミドの z を変化させたときの加工痕の写真を示す。加工痕形状は若干横長の楕円形状をしておりレーザのビーム形状が真円からずれていると推定される。ビーム径最小位置($z \approx 8.5\text{mm}$)では加工穴外周部は比較的シャープなエッジであるが、最小位置からの距離が大きくなるとエッジ部のダレが見られる。加工痕直径の z 依存性を図6に示す。極小値が $z = 8.5\sim 8.8$ 付近にあり、その両側で加工痕直径の減少が見られる。図7にレーザ光のショット数による加工痕形状の変化と直径依存性を示す($z=10.0\text{mm}$)。形状はショット数に依らずほぼ一定形状でありビームの位置ずれがないことがわかる。加工表面位置がビーム径最小位置から光源側にずれると中心部がシャープな形状に加工される傾向にあり、シ

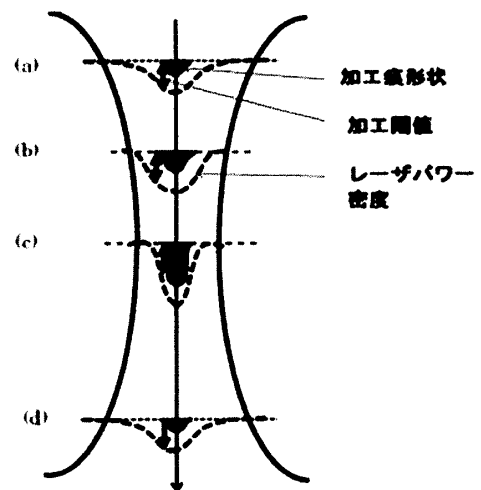


図8. ビーム径と加工形状の関係

ショット数が増加するとより顕著になる。また加工痕直径は初期に急激に増加し以後一定値に近づく一般的な傾向を示す。図8にレーザ光のビームウエスト付近の加工直径と加工閾値の関係を模式的に示す。ビーム径最小位置からzが少し変化すると加工表面でのパワー密度分布が拡がり加工痕直径は増加する。(zの変化量が少ないときはパワー密度の絶対値の変化が小さく加工閾値の影響は受けないとする。)その両側における加工痕直径の減少は試料表面でのパワー密度の低下による加工閾値以上のパワー密度を持つレーザ光の領域の減少による。加工が熱的なプロセスのみとするとショット数の少ない初期は表面での横方向への熱拡散が優勢でありショット数とともに加工範囲が拡がると考えられる。その後アブレーションにより発熱位置が材料内下部に移動すると共に試料表面が光源から遠ざかる場合はパワー密度がさがり加工が進展しない、光源に近づく場合は中心部のパワー密度が増加し加工痕の中心部の限られた領域のみがさらに加工されると考えられる。また355nmのレーザ光波長を考慮するとポリイミドの結合が多光子吸収等により化学的に分解飛散していることも考えられる。正確なビームプロファイル及びビームウエストとの相対位置も考慮に入れた3次元的なパワー密度に基づいた熱的なプロセスの解明が必要である。しかしながら今回は加工痕直径を顕微鏡の目視観察から求めておりその加工痕の選択範囲等測定精度を今後さらに検討する必要もある。

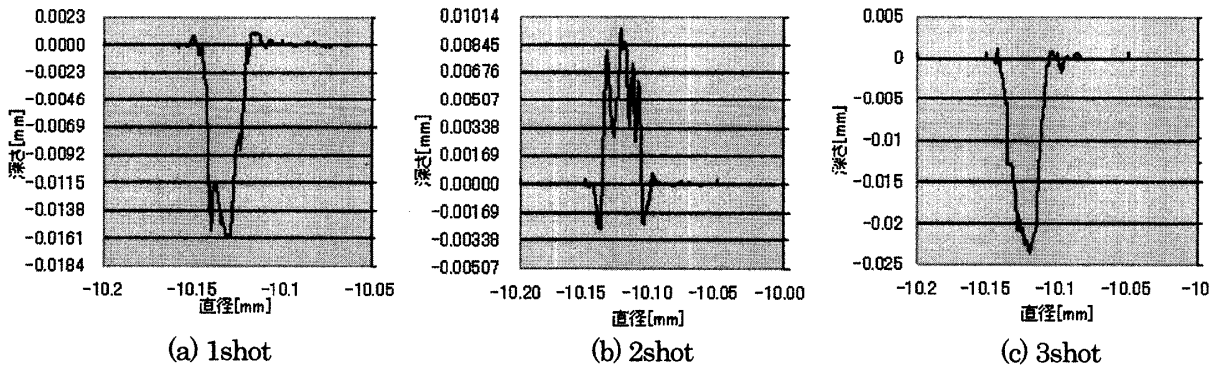


図9. アクリル加工形状のショット数依存性 (z=7.0mm)

図9にアクリルの1～3ショットのレーザ光照射による加工痕の段差測定の結果を示す。アクリルの場合zにも依存するが1ショットでは穴外周部に盛り上がりが発生する。比較的円形に近い穴形状を示すが、2ショット目で全体的に照射部に顕著な盛り上がりが発生し、3ショットでその盛り上がりが除去される傾向にある。アクリルはポリイミドと比較して、熱膨張率が3倍、熱収縮率が約1桁大きくレーザ照射による軟化、分解時の体積変化が大きい可能性があり、昇温あるいは冷却過程での体積膨張が原因と考えられる。またショット数増加とともに加工痕周辺に加工変質相と見られる領域が増加する傾向にあり熱的な影響が強いと考えられる。最小加工痕直径はレーザアライメントペーパー：60μm、ポリイミド：30μm、アクリル：40μmと材料により異なり、レーザ光の吸収係数、熱拡散率、分解温度等に依存する加工閾値を反映していると考えられる。

単結晶サファイアの(0001)面(厚さ500μm)の加工写真(z=8.8mm, 2ショット)を図10に示す。アクリルと同様な若干横長の楕円形状を示し外周部にわずかな盛り上がりが見られる。Z=8.8mmの位置でのショット数を変化させたときの加工痕の段差測定の結果を図11に示す。図からわかるようにいずれにも加工穴外周部にわずかな盛り上がりが見られ、サファイア融液が外周部に押し上げられたことを示している。加工痕直径は1～3ショットまで10μm弱増加しそれ以後は約

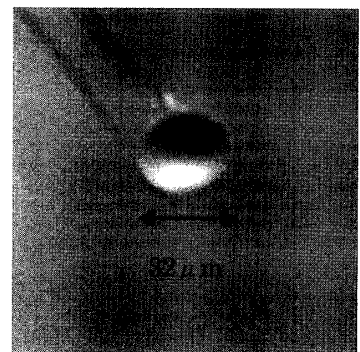


図10. サファイアの加工痕

30 μm の一定値で変化しないが、加工深さはショット数に比例して増加 (1~7 μm) している。マーキングに使用した100ショットでは

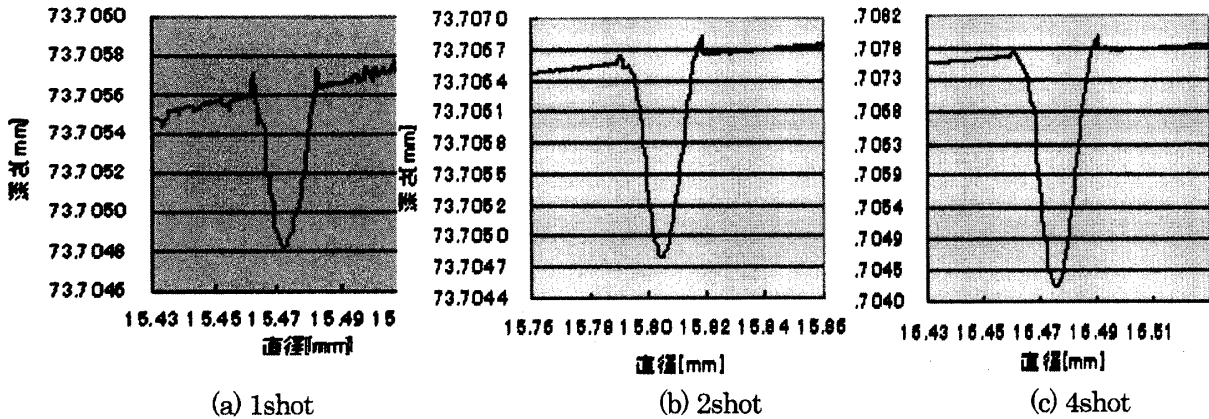


図 1 1. サファイア加工痕形状のショット数依存性 ($z = 8.8\text{mm}$)

穴径は40、深さは約20 μm で大きな変化はみられないが、底部の形状が複雑に変化しており微妙なレーザー光のショット間の位置ずれあるいは融解凝固の結晶化過程での過冷却等の影響の可能性はある。サファイアの1ショットではz位置が最適位置から2~3mmずれたところでは加工痕が観測されない場合があり、大きなバンドギャップによる高加工閾値が原因していると推定される。後述するダイヤモンドにみられたクラックの発生はほとんど見られない。

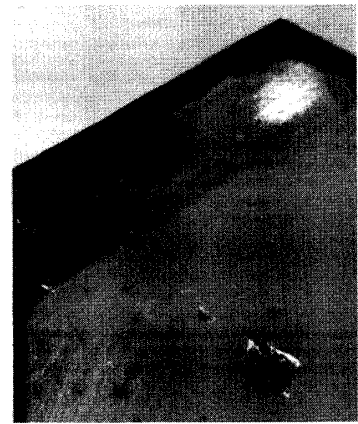


図 1 2. ダイヤの加工痕列

図 1 2 に人工ダイヤモンドの加工痕を示す⁹⁾。試料はIb type であり、加工面は(111)面である。写真からわかるように三角形状のクラックが数か所で発生している。おそらくダイヤモンドの壁開面 (111) に沿ったク

ラックと考えられる。図 1 3 に1ショットの加工痕と段差を示す。表面近傍の形状は直線的であり壁開面と考えられる。z がビームウエスト近傍位置での1ショットの加工痕ほとんどが写真のようなクラックが発生しているが、2ショットの加工痕にはクラックの発生が見られない (図 1 4)。ダイヤモンドの高い熱伝導率により1ショットで照射されたレーザー光のエネルギーが速やかに周囲に拡がり冷却時の温度分布により加工痕周辺に大きな熱応力が入り加工痕表面からクラックが入ると考えられる。2ショット目が引き続き照射されることにより冷却による温度差が緩和されるかあるいは加工表面の高温化による塑性変形等により壁開が

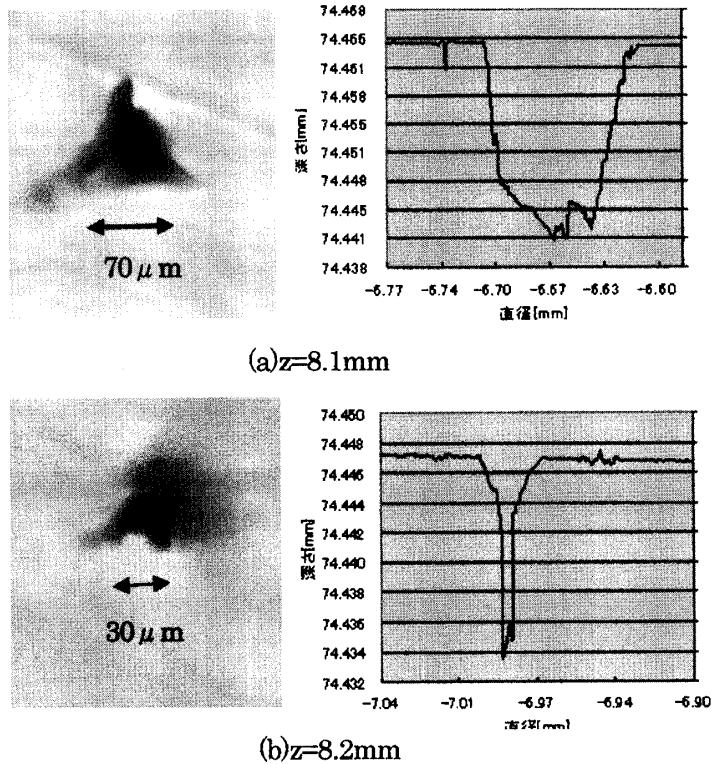


図 1 3. ダイヤモンドの加工痕と形状

起こり難くなったとも考えられる。熱伝導率がダイヤモンドよりも低いサファイアではレーザー照射による昇温領域が狭く熱歪が塑性変形により緩和されているかあるいは壁開性が弱いことがこの違いの原因と考えられる。しかしながら熱的なシミュレーションにより異方性も考慮に入れた定量的な検討がひつようである。ショット数の多い加工痕で散発的に見られるクラックは育成されたダイヤモンドに内在していた歪みあるいは表面に生じている成長ステップ等との相関があると推定されるが原因は不明である。

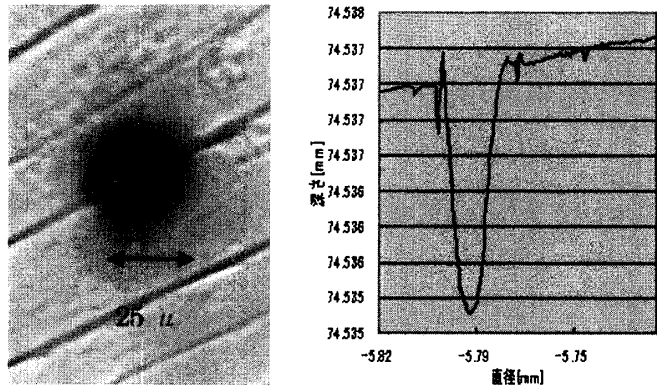


図14. ダイヤモンドの2ショットの加工痕、

5. まとめ

今回の実験においてパルスレーザー（波長：355nm、パルス幅：35ns）をパルスエネルギー：0.24 μ J、繰り返し周波数：25kHz の条件下でビームウエスト位置と資料表面の相対位置及びレーザー光のショット数を変化させて加工痕形状との関連を調べ、加工現象を定性的にその概略が把握できたと考えられる。しかし詳細な定量的メカニズムの解明には、加工痕形状のさらに精密な計測及び SEM 等による詳細な観察が必要である。またレーザービームパワー密度のプロファイルとレーザー加工閾値との関係が重要でありそれらの定量的な把握が必要と考えられる。標準試料としてのポリイミド、ガラス等の等方性の材料とダイヤモンド、サファイア、シリコン等のバンドギャップ、熱伝導率の異なる単結晶材料で基礎的な実験を行いその加工メカニズムを究明していく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたりご指導頂きました福井工業技術センターに感謝いたします、また住友電気工業（株）エレクトロニクス材料研究所のご支援及び福井工業大学特別研究費助成に感謝いたします。

参考文献

- (1) 川澄博通：“最先端レーザー加工技術”シーエムシー(1989)
- (2) 永井治彦：“レーザープロセス技術”第3章、オプトロニクス社 (2000)
- (3) 増原 宏：“レーザープロセッシング応用便覧”NGT (2006)
- (4) 根元承次郎：“レーザー工学”6章 培風館(2001)
- (5) M. Takesada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, 4613 (2003)

(平成 20 年 3 月 31 日受理)