

フェムト秒レーザーを用いた半導体関連材料の加工と特性の評価

水野 俊男¹⁾・向本 徹¹⁾・横谷 篤至²⁾・川原 公介³⁾・二宮 孝文^{3,4)}・沢田 博司³⁾・黒澤 宏⁵⁾

Photo-Machining of Semiconductor Related Materials with Femtosecond Laser Ablation and Characterization of Its Properties

Toshio MIZUNO, Toru MUKUMOTO, Atsushi YOKOTANI, Hiroshi SAWADA
Takahumi NINOMIYA, Kosuke KAWAHARA, Kou KUROSAWA

Abstract

Silicon is the most basic material in the semiconductor industry, because it is used as a substrate of the integrated circuits (ICs). The silicon substrates are planed to reduce the thickness as thin as 50 μm for the ICs of the next generation. Since mechanical strength of such a thin substrate is extremely weak, it is very difficult to cut by the convectional mechanical dicing technique. Therefore new techniques using lasers in which non-contact process is expected have been tried to develop by many researchers. Especially, it is said that a femtosecond laser can do processing with a little thermal effect compared with the case using the nanosecond laser. However, it has not been completed to eliminate the thermal effects, even if use with femtosecond laser. Then to find out the reason, we have tried to observe the process that the drilled hole is formed with a high speed imaging technique using ICCD camera. A regenerative amplified Ti:sapphire laser ($E = 30 \sim 500 \mu\text{J/pulse}$, $\tau = 200 \text{ fs}$, $\lambda = 780 \text{ nm}$, $f = 10 \text{ Hz}$) was used and focused onto a 50 μm -thick silicon sample. The gate of the ICCD camera was set at 5 ns. First, we investigated the dependence of laser energy on the speed of the formation of the drilled hole. As a result, it was found that the larger the energy, the slower the speed of the formation. Even if the smaller energy density was used, very slow speed of formation and much larger thermal effects are observed when the defocused condition was used. So we can say that the degree of the thermal effects is not simply related to the energy density of the laser but strongly related to the speed of the formation, which can be measured by the ICCD camera. The similar tendency was also obtained for other materials, which are important for the fabrication of ICs (Al, Cu, SiO_2 and acrylic resin).

Key Words:

Femtosecond laser, Thin semiconductor substrate, Thermal effect, Drilled hole, High speed imaging technique, ICCD camera

1. はじめに

近年の電子機器の小型化、高性能化への要求はますます激しくなっており、機器を構成する電子デバイス自体の小型化も強く求められている¹⁻²⁾。そこで、デバイスの小型、高性

能化を実現する手段の一つとして基板自体を紙のように薄くするという方法が考えられる。これが実用化できれば、例えばICカードに用いられているICチップの基板を薄くすることでICチップを積層させ、より高機能なカードが作れると考えられる。他にも、極薄化したICチップを公文書、証明書や紙幣といった紙へ埋め込んで利用することも検討されている。特にICチップ用シリコン基板の厚さを従来用いられている500~800 μm から、今後は、50 μm 以下にまで薄く

1) 電気電子工学専攻

2) 電気電子工学科助教授

3) NEC マシナリー (株)

4) 物質エネルギー工学専攻

5) 電気電子工学科教授

することを目的に研究開発が行われている。しかし、そのためには、多くの問題点を解決しなければならないが、その中の問題点の一つとして、このように極薄化した基板は、機械的強度が極端に低下し、従来用いられてきた機械式切削加工では切断面にクラックやチッピングが発生してしまうということが挙げられる。そこで、解決策として、材料を非接触で加工できるレーザー加工が注目されている。現在までに、加工用レーザーとしては、エキシマレーザーやYAGレーザーなどのナノ秒レーザーが開発されてきた⁴⁹⁾が、これらを極薄シリコン基板の加工に適用させた場合、照射したレーザー光のエネルギーが熱として周辺部へ伝わり、材料を部分熔融させ盛り上がりが発生してしまうという問題がある。そこで、我々は照射した光のエネルギーが、材料中を熱拡散によって広がる前に注入でき、効率良く照射部位のみ浸透させ、アブレーションにより除去を行なうことで、熱影響の低減が期待できると考えられるフェムト秒レーザーを加工用光源に用いて、極薄半導体基板の微細加工実験を行ってきた。その結果、照射したパルスのエネルギー、パルス幅、加工穴直径、加工穴深さの関係をもとに低エネルギー側でアスペクト比(深さ/直径)が最大となる加工条件を見出してきた⁷⁾。しかし、フェムト秒レーザーを用いても、照射条件によっては周辺部に熱影響による盛り上がりが発生し、熱影響を完全に抑制できるわけではないことも同時に分かってきた。そこで、本研究ではイメージインテンシファイアを装着した高速ICCDカメラを用いて、フェムト秒レーザーアブレーションによるシリコン基板の加工穴形成過程を時間分解測定し、加工穴形成過程と、加工後の熱影響の関係を明らかにする事を目的として実験を行った。さらに、シリコンとは熱的性質が異なり、半導体製造において関連のある材料に関しても、加工穴形成過程を計測し、シリコンと共に比較することで、フェムト秒レーザーアブレーションによる加工特性を明らかにする実験も行った。

2. 実験装置及び方法

図1に実験装置図を示す。装置はフェムト秒レーザー発生部、サンプル加工部、撮影部の三つから構成されている。フェムト秒レーザー発生部は、Nd:YVO₄レーザー励起 Ti:Al₂O₃レーザーをシード光とし、再生増幅器内でストレッチャー、再生増幅、コンプレッサーを通じてエネルギーを増幅させた。増幅させたレーザー(エネルギー:500μJ/pulse, 繰り返し周波数:10Hz)は、パルス幅200fsに調整した後、サンプル加工部へ送り、焦点距離100mmの平凸レンズを用いて、サン

プルへ集光照射した。フェムト秒レーザーのエネルギーは、フィルターを使用し、30μJ/puls, 180μJ/pulse, 350μJ/pulse, 500μJ/pulseに調整した。平凸レンズの前面にメカニカルシャッターを配置し、サンプルへのレーザーのショット数を1ショットに制御した。撮影部は、レンズなどの障害物を避けて、加工穴形成過程をできるだけ正面から撮影するため、フェムト秒レーザーの光軸から約15度の位置にICCDカメラを設置した。照明用光源として、CWのNd:YAGレーザーの第二高調波(出力:50mW)を用いた。ここで、アブレーションによって生じるプラズマやブルームの自発発光は撮影の妨げとなるため、カメラの前面に色ガラスフィルターを挿入する事で、ブルームなどの雑光を分離し、サンプル表面で反射した照明光のみをカメラに入光させた。本実験では、ICCDカメラは約70nsの内部ディレイを持ち、レーザー光がサンプルに到達するより70ns以前のトリガー信号が必要である。現システムでは、再生増幅器を励起させるNd:YAGレーザーのQスイッチ信号をトリガーとした。パルスジェネレーターを用いて、再生増幅器内で光が何十往復もする時間、及びケーブル、その他のディレイをすべて考慮して、カメラのシャッターが開くタイミングと、レーザーがサンプルに照射されるタイミングを一致させた。なお、再生増幅に要する時間は光軸調整のたびに变化するので、タイミング調整は撮影に先駆けて必ずおこなった。カメラのゲート幅は5nsに設定した。表1にシリコン及び、比較のために用いた銅、アルミ、合成石英、アクリルの物性値を示す。熱伝導率では、金属である銅、アルミが高く、絶縁物である合成石英、アクリルは低い。また、半導体であるシリコンは、両者のほぼ中間の特性を持っている。さらに、これらの物質は、その他の熱に関するパラメータである比熱、融点、密度についても大きく異なっている。このように、熱的性質の異なる物質を用いることで、比較が行なえるようにした。

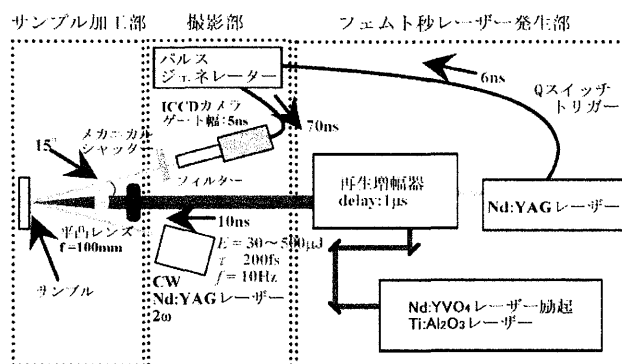


図1 実験装置構成図

表1 各材料の物性値

	比熱 (J/g・K)	熱伝導率 (W/m・K)	融点 (K)	密度 (g/cm ³)
シリコン	0.716	148	1683	2.34
アルミ	0.967	237	937	2.69
銅	0.387	398	1357	8.93
石英ガラス	0.911	1.4	2073	2.22
アクリル	1.47	0.17	373	1.19

3. 実験結果及び考察

3.1 照射エネルギー依存性

サンプルにシリコン基板を用いて、レーザーのパルス幅を200fsに調整し、エネルギーを30μJ/pulse, 180μJ/pulse, 350μJ/pulse, 500μJ/pulseと変化させて加工を行った時の、高速度ICCDカメラによる加工穴形成過程の計測結果を図2に示す。加工は、最小の加工穴が得られるレンズ-サンプル間の距離で行った。これらは、200μm角の領域を撮影したもので、フィルターを挿入することで、プラズマやブルームの自発発光を撮影することなく、ほぼ正面から、時間の経過と共に加工穴直径が変化していく様子を撮影することができた。

図3に加工穴直径の時間変化をグラフ化した結果を示す。横軸にレーザーが照射されてからの経過時間(ns)、縦軸に加工穴直径(μm)をとり10nsごとにプロットした。この加工穴直径は、ICCDカメラの画像と、加工を行ったサンプルの光学顕微鏡写真を対応させて調べた。なお、今回の計測は、カメラのゲート幅が5nsであることを考慮し、時間軸方向に±2.5nsのエラーバーを書き加えた。このエネルギーによる加工穴形成過程の違いをより詳しく比較するために、穴があき始めた時の直径の90%にまで広がる時間を立ち上がり時間と定義した。照射レーザーのエネルギーが30μJ/pulse, 180μJ/pulseの場合の立ち上がり時間は、約10nsとなり、350μJ/pulse, 500μJ/pulseの場合は、約30ns程度かかるということが分かった。フェムト秒という短い時間いエネルギーを注入しても、実際に何らかの表面変化を起こして、その部分から飛び出してしまうには、数十nsオーダーの時間がかかることが分かった。

ここで、フェムト秒レーザーを用いて、シリコンを加工する場合、これまでに行われてきた研究から、低エネルギーで加工を行うことで、熱影響が小さくなるということが分かっている⁷⁾。そこで、穴あけ加工したシリコンサンプルの光学顕微鏡写真から加工後の穴形状を観察し、盛り上がり幅のエ

ネルギー依存性と、立ち上がり時間のエネルギー依存性の比較を行った。図4にエネルギーごとに、熱影響による盛り上がり幅をプロットしたグラフを示す。このグラフから、エネルギー180μJ/pulseと350μJ/pulseの間で、熱影響による盛り上がりは、大きく変化していることが分かる。図5にエネルギーと、立ち上がり時間の関係を示す。このグラフから、今回計測を行った立ち上がり時間も、エネルギー180μJ/pulseと350μJ/pulseの間で大きく変化し、二つのグラフを比較した結果、同様の傾向を示した。このことから、熱影響による盛り上がりと、立ち上がり時間の間には、密接な関係があるということが分かった。

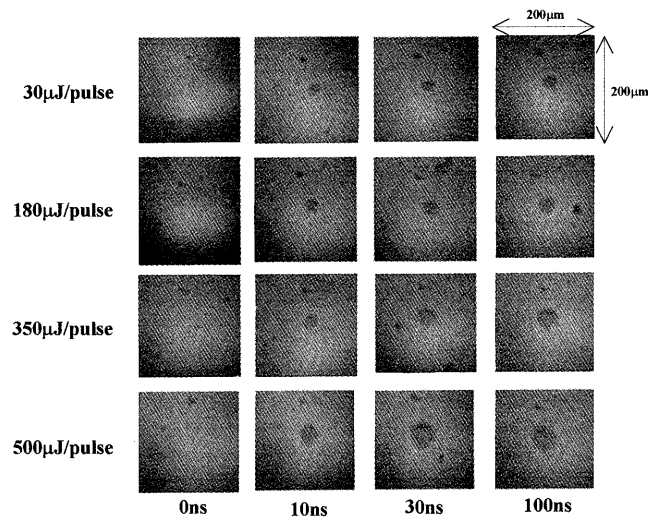


図2 加工穴形成過程

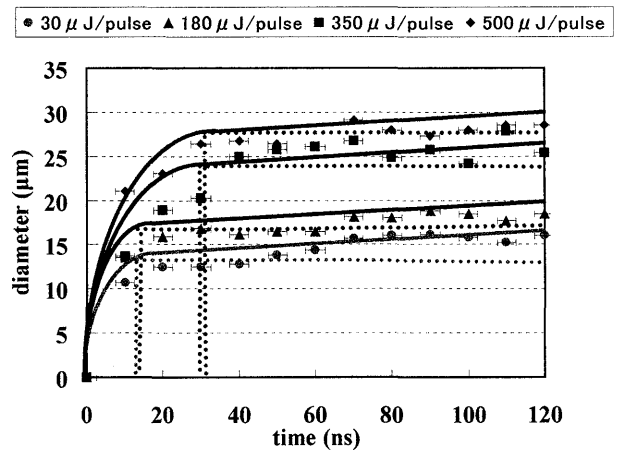


図3 加工穴直径の時間変化

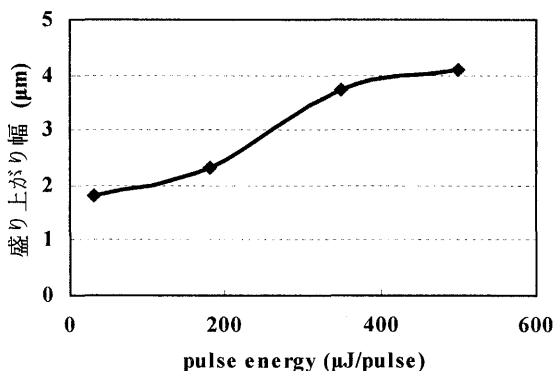


図4 熱影響による盛り上がり幅のエネルギー依存性

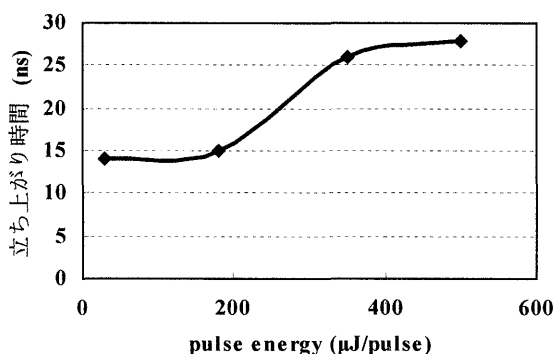


図5 立ち上がり時間のエネルギー依存性

3.2 集光条件依存性

3.1節の結果から、熱影響の大きい加工は、立ち上がり時間が遅いと考えられる。これまでに行われてきた研究から、焦点位置をわずかにずらすと、熱影響が顕著に現れる事が分かっている⁷⁾。そこで、平凸レンズを最小の加工穴が得られる焦点位置をデフォーカス量0とし、その位置から平凸レンズをメカニカルシャッター側に500μm, 1000μmずらした焦点位置で加工を行い、同様に時間分解測定を行った。レーザーのパルス幅を200fs, エネルギーは、デフォーカス量0における加工で、熱影響による盛り上がり幅が、最も小さかった30μJ/pulseとした。図6にICCDカメラによる撮影結果を示す。これらの画像は、200μm角の領域を撮影したもので、デフォーカス量の違いにより、加工穴形成過程に明らかな違いが現れた。

デフォーカス量0, 500μm, 1000μmのそれぞれの加工穴形成過程をエネルギーごとに調べた後、立ち上がり時間を算出した結果を表2に示す。焦点位置をずらすと、それに対応して、立ち上がり時間も遅くなる事が分かった。

図7にそれぞれのフォーカス位置で得られる加工穴の面積と立ち上がり時間の関係をグラフ化したものを示す。横軸に面積(μm²), 縦軸に立ち上がり時間(ns)をとり、プロットした。さらに、加工面積と照射エネルギーからフルエンスを計算し、フルエンスの低い順に、白から黒の6段階で示した。一般に、低エネルギーにおける加工では、熱影響の少ない加工が出来るといわれているが、このグラフから、フルエンスの大小よりも、フォーカス位置をずらすことで、加工面積が大きくなる事が、立ち上がり時間に大きく影響している事が分かった。

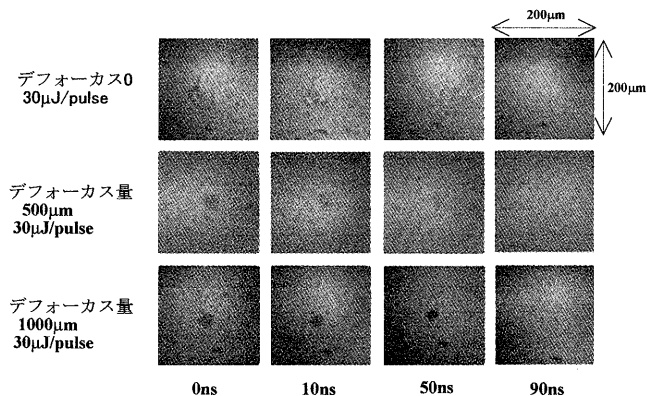


図6 加工穴形成過程の集光条件依存性

表2 集光条件, エネルギーごとの立ち上がり時間

デフォーカス量	30μJ/pulse	180μJ/pulse	350μJ/pulse	500μJ/pulse
0μm	10ns	10ns	30ns	30ns
500μm	25ns	25ns	30ns	30ns
1000μm	60ns	60ns	60ns	60ns

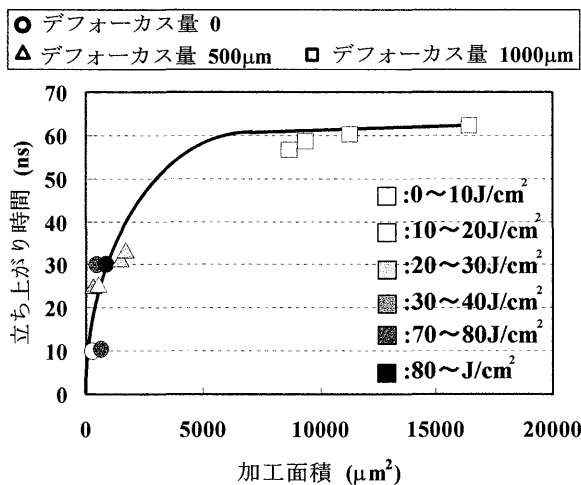


図7 加工面積と立ち上がり時間の関係

3.3 物性値の異なった材料との比較

シリコンと熱的性質が異なり、さらに半導体製造に関連のある、銅、アルミ、合成石英、アクリルをサンプルに用いて、フェムト秒レーザーアブレーションによる加工穴形成過程を ICCD カメラで計測し、比較を行なった。デフォーカス量は0とし、レーザーのエネルギーは500 μ J/pulse、パルス幅は200fsで穴あけ加工を行った。図8に穴あけ加工を行った際の ICCD カメラによる撮影結果を示す。画像は200 μ m 角の領域を示している。また、表3に示すように、シリコンと同様に立ち上がり時間を調べた所、アルミは約30ns、銅は約50ns以上かかり、石英、アクリルは約10ns程度の時間しか必要としなかった。立ち上がり時間と表1に示した各物性値の関係をグラフ化し、違いを決定づけているパラメータが何であるかを考察した。横軸に各物性値、縦軸に立ち上がり時間をとった。まず、図9(a)に示したように、融点との関係では、最も融点の低い材料が最も溶けやすいと考えられるアクリルと、最も融点が高く溶けにくいと考えられる合成石英の立ち上がり時間がほぼ等しくなるなど相関はみられなかった。次に、図9(b)に示したように、比熱との関係でも、最も比熱が大きく温まりにくいと考えられるアクリルの立ち上がり時間が短く、最も比熱が小さく温まりやすいと考えられる銅の立ち上がり時間が長いなど明確な相関はみられなかった。これらの物質は、密度が大きく異なっているため、同じ面積にレーザーが照射されても、照射領域内に含まれる分子数が異なる。そこで、単純に比熱だけでなく、比熱と密度から、単位体積を1K上昇させるのに必要なエネルギーを換算した結果、図9(c)に示したように、最もエネルギーを必要とする銅の立ち上がり時間が最も長く、エネルギーを必要としないアクリル、石英、アルミの順番に立ち上がり時間が短くなったが、シリコンがやや、はずれているため明確に相関が強いとは言えない。最後に、図9(d)に示したように、熱伝導率と立ち上がり時間の関係では、熱伝導率の小さい順番と、立ち上がり時間短い順番が一致したため、非常に強い相関があると考えられる。これらのことから、今回調査を行なった中では、立ち上がり時間は、熱伝導率と最も強い相関を持っており、フェムト秒という短い時間にエネルギーを注入しても、数十 ns かかる加工穴形成過程の間に、熱の逃げ方が大きく影響していることが分かった。

4. まとめ

次世代 IC チップに用いられる極薄シリコン基板の、フェムト秒レーザーアブレーションによる加工穴形成過程と熱

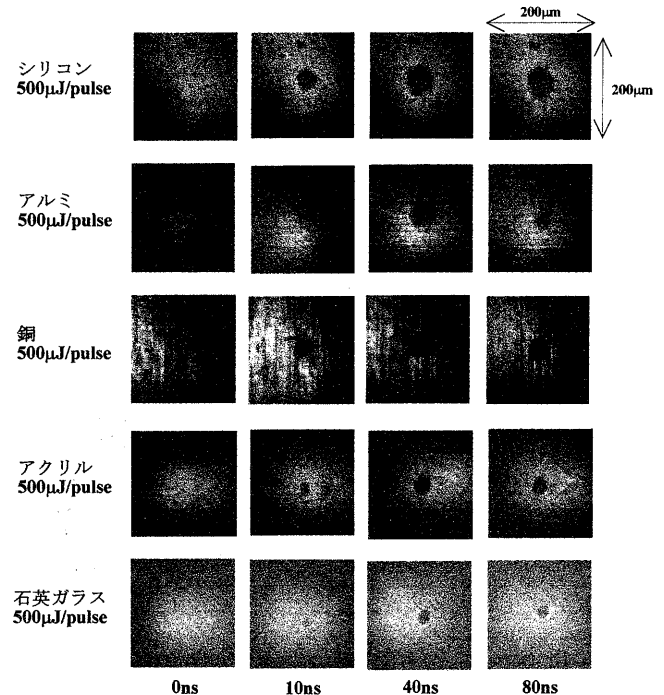
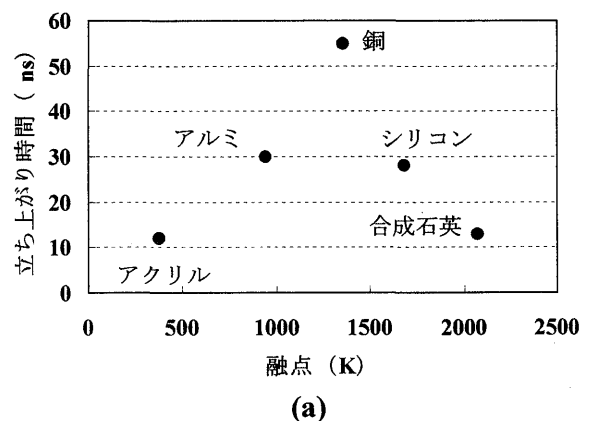
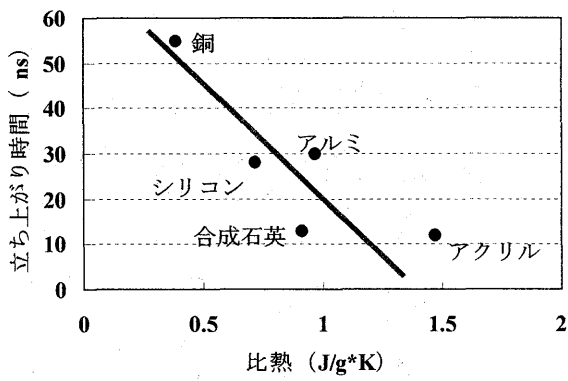


図8 各材料の加工穴形成過程

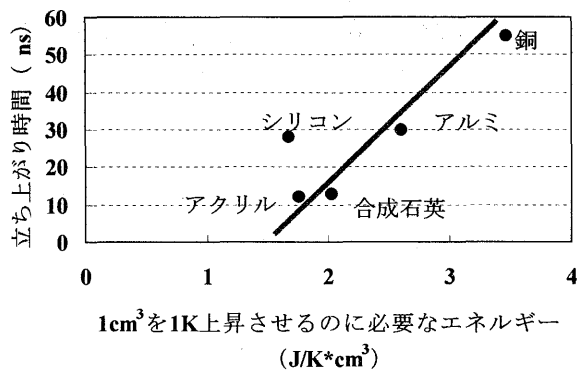
表3 立ち上がり時間一覧表

	立ち上がり時間
シリコン	30ns
アルミ	30ns
銅	55ns
石英ガラス	10ns
アクリル	10ns

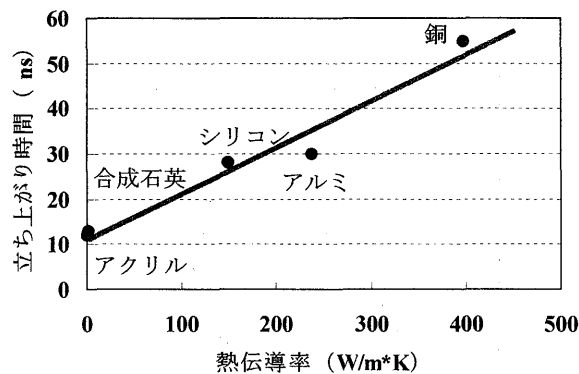




(b)



(c)



(d)

図9 物性値と立ち上がり時間の関係

(a) 融点と立ち上がり時間 (b) 比熱と立ち上がり時間
(c) 1cm^3 を1K上昇させるのに必要なエネルギーと立ち上がり時間 (d) 熱伝導率と立ち上がり時間

影響との関係を調べるため、ICCDカメラを用いて加工穴形成過程を時間分解測定した。その結果、

- ・ゲート幅5nsで加工穴形成過程を計測できた。
- ・エネルギーによって加工穴形成に差が出た。

- ・立ち上がり時間は、熱の影響を表している事が分かった。
- ・立ち上がり時間は、加工面積にも大きく関係していることが分かった。

物性の異なる多様な材料に対して比較を行った結果、

- ・熱影響の大小は、熱伝導率の大小に最も密接に関係しているという事が分かった。

以上の結果から、フェムト秒レーザーを用いた加工において、立ち上がり時間を調べることは、加工時の熱影響を調べるのに有効であると考えられる。今後照射条件などにこの情報をフィードバックすることにより、熱影響の少ないシリコンの加工法を発展させていけると考えられる。

参考文献

- 1) S. Ohmi and R.T. Tung "Effect of Ultrathin Mo and Mo Six Layer on Ti Silicide Reaction" *J. Appl. Phys.*, 86, pp. 3655-3660 (1999).
- 2) S. Ohmi and R. T. Tung "Silicide Formation in Co-Deposited Ti Six Layers; The Effect of Deposition Temperature and Mo", *J. Electronic Materials*, 28, pp. 1115-1122 (1999).
- 3) 「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), コロナ社 (1999).
- 4) J. Ihlemann, B. Wolff and P. Simon, "Nanosecond and Femtosecond Excimer Laser Ablation of Fused Silica", *Appl. Phys.* A54, p. 363, (1992).
- 5) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore and M. D. Perry, "Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses", *Phys. Rev. Lett.*, 74, p. 2248, (1995).
- 6) J. Ihlemann, A. Scholl, H. Schmit and B. Wolff-Rottke, "Nanosecond and Femtosecond Excimer-Laser Ablation of Oxide Ceramics", *Appl. Phys.*, A60, p. 411, (1995).
- 7) 川原 公介, 「フェムト秒レーザーを用いた半導体基板の加工技術の開発」, 宮崎大学大学院修士論文, (2002).
- 8) 川原 公介, 「フェムト秒レーザーアブレーションによる材料加工技術の開発」, 宮崎大学卒業論文, (2000).
- 9) 松尾 直之, 「フェムト秒レーザーを用いた極薄半導体基板のダイシング技術の開発 ～加工ダイナミックスの計測～」, 宮崎大学大学院修士論文, (2003).

- 10) 黒木 泰宣, 「フェムト秒レーザーを用いた極薄半導体基板のダイシング技術の開発 ～時間波形制御による高精度加工の検討～」, 宮崎大学修士論文, (2003).
- 11) 沢田 博司, 「フェムト秒レーザーアブレーションによる微細周期構造の形成」, 2002 年度精密工学会秋季大会 学術講演論文集
- 12) 沢田 博司, 「フェムト秒レーザーアブレーションにおけるレーザ発振条件の加工特性に及ぼす影響」, 精密工学会誌, 69 巻, 1 号, P84, (2003).
- 13) 黒澤 宏, 「レーザー 基礎の基礎」, オプトロニクス社, (1999).
- 14) 宮崎 建創, 超短パルス高強度レーザーの基礎, レーザー加工学会誌 Vol8, No.3, P28, (2001).
- 15) J.Herrmann/B.Wilhelmi 「超短光パルスレーザー」, 共立出版株式会社, (1991).
- 16) R. Stain, M. Boyle, A. Thoss, A. Rosenfeld, D. ashikenasi, G. Com, E. Campbell, I. V. Hertel, "Ultrafast laser ablation of dielectrics employing temporally shaped femtosecond pulses", SPIE Proc. 2nd Int. Symp. on laser Precision Microfabrication, Singapore, 2001. P. 78, (2002).
- 17) R. Srinivasan, E. Sytcliffé and B. Bararen, "Ablation and Etching of Polymethylmethacrylate by Very Short (160 fs) Ultraviolet (308 nm) Laser Pulses", *Appl. Phys. Lett.*, **51**, p. 1285, (1987).
- 18) S. Küper and M. Stuke, "Femtosecond UV Excimer Laser Ablation", *Appl. Phys.*, **B 44**, p. 199, (1987).
- 19) S. R. Cain, F. C. Burns, C. E. Otis and B. Bararen, "Photothermal Description of Polymer Ablation: Absorption Behavior and Degradation Time Scales", *J. Appl. Phys.*, **72**, p. 5172, (1992).
- 20) Z. Bor, R. Racz, G. Szabo, D. Xenakis, C. Kalpouzios and C. Fotakis, "Femtosecond Transient Reflection from Polymer Surfaces during Femtosecond UV Photoablation", *Appl. Phys.*, **A 60**, p. 365, (1995).
- 21) S. küper and M. Stuke, "Ablation of Polytetrafluorethylene (Teflon) with Femtosecond UV Excimer Laser Pulses", *Appl. Phys. Lett.*, **54**, p. 4, (1989).
- 22) S.Preuss, M. Spath, Y. Zhang and M. Stuke, "Time Resolved Dynamics of Subpicosecond Laser Ablation", *Appl. Phys. Lett.*, **62**, p. 3049, (1993).
- 23) B. Wolff-Rottke, J. Ihlemann, H. Schmit and A. Scholl, "Influence of the Laser-Spot Diameter on Photo-Ablation Rates", *Appl. Phys.*, **A60**, p. 13, (1995).
- 24) E. N. Glezer and E. Mazur, "Ultrafast-Laser Driven Micro-Explosions in Transparent Materials", *Appl. Phys. Lett.*, **71**, p. 882, (1997).
- 25) J. Sun, J. P. Longtin and P. M. Norris, "Ultrafast Laser Micromachining of Silica Aerogels", *J. Non-Cry. Sol.*, **281**, p. 39, (2001).
- 26) K. Kumagai, M. Okoshi and M. Hanabusa, "Micromachining Transparent Materials by Femtosecond Laser", *Rev. Laser Eng.*, **27**, p. 773, (1999).
- 27) S. Küper and M. Stuke, "Femtosecond UV Excimer Laser Ablation", *Appl. Phys.*, **B 44**, p. 199, (1987).
- 28) E. Ohmura and I. Miyamoto, "Molecular Dynamics Simulation of Laser Ablation Phenomina", *Rev. Laser Eng.*, **26**, p. 800, (1998).
- 29) K. Kawahara, Y. Kurogi, N. Matsuo, H. Sawada, A. Yokotani and K. Kurosawa, "Morphological Characterization of Various Kind of Materials in Femtosecond-Laser Micromachining", SPIE Proc. 2nd Int.Symp.On laser Precision Microfabrication, Singapore, 2001, P86, (2002).
- 30) K. Kawahara, Y. Kurogi, N. Matsuo, H. Sawada, A. Yokotani and K. Kurosawa, "Development of Dicing Technique for Thin Semiconductor Substrates with Femtosecond Laser Ablation" SPIE Proc. 3rd Int. Symp. On Laser Precision Microfabrication, Osaka, 2002. P526,(2003).