

V-3.研究開発項目③ MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発

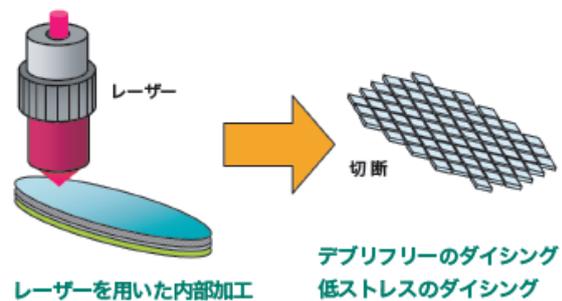
(1)多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所/東北大学)

1. 研究の概要

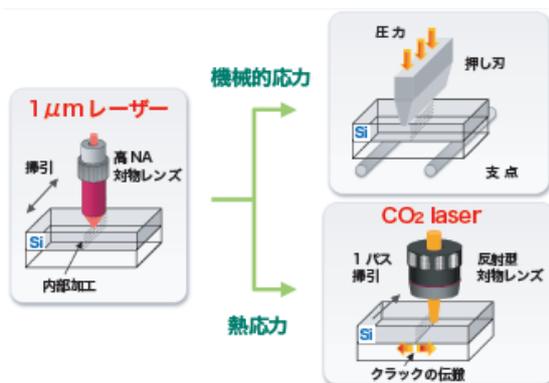
特徴

MEMS 素子は内部に可動機構やダイアフラムなどの脆弱構造を有しており、ウェハをチップに分割する際に半導体集積回路の様に水を掛けながら回転刃でウェハを切断すると素子が破損しやすい。現状では、破損を避けるためにチップ保護の工程を導入しておりデバイス設計が制約されている。そこで、新たなダイシング手法として、パルスレーザーによるウェハの内部加工に着目し、工業的に広く用いられている高繰り返し Nd:YVO₄ レーザーやファイバーレーザー、CO₂ レーザー等を用いて低コストにドライで切削粉の出ないダイシング技術を開発した。従来のダイシング技術に比べて、製造工程の簡素化、歩留まりの向上を可能とする。



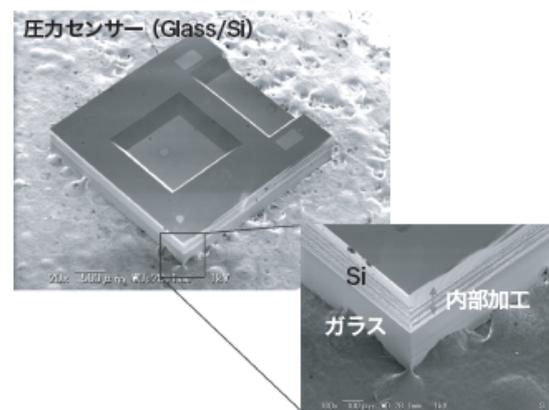
技術内容・特性

高 NA の対物レンズを用いてパルス赤外レーザー光をウェハ内部に集光すると、集光点近傍で選択的に光吸収が起き内部クラックを形成することができる。この内部クラックを連続的に形成することによりウェハ内部に脆弱部を形成し機械的応力を加えることによりチップ分割が可能となる。特に、ガラス/Si から構成される多層ウェハの場合、波長 1 μm 、パルス幅 100~200ns のレーザーを用いて Si 層だけに内部加工を施すと、デブリフリーかつ低ストレスで切断が可能となる。さらに、波長 10 μm の CO₂ レーザーを Si 層側からガラス接合面に対して照射し熱応力を加えると、より低ストレスでのチップ分割が実現する。



用途・目的

本ダイシング技術により、積層ウェハを低ストレスに切断でき水や切削粉に対する設計上の制約から解放されるため、従来にはない MEMS の多様化が期待できる。今後は、レーザー総研と東北大に設置した設備で、高集積・複合 MEMS 製造技術開発事業への参加企業その他を対象に、切断テスト等を行い、プロセス技術の普及を図る。本研究は、レーザー学会進歩賞と電気学会の電気学術振興賞(論文賞)を受賞し、学術面でも高く評価されている。



2. 成果の詳細

第1章 緒論

1.1 背景及び目的

MEMS (Micro Electro Mechanical System : 微小電気機械システム) は小型・低消費電力・高機能という特徴を活かし、自動車・情報通信分野等で市場規模を拡大し続けている。この MEMS とは、半導体集積技術を用いてガラスや Si 基板上に、電子回路・機械要素部品・センサ・アクチュエータなどを作り込んだデバイスを示す。代表例としてはインクジェットプリンタヘッド・圧力センサ・加速度センサ¹⁻¹⁾等が挙げられる。

MEMS デバイスは、薄膜形成、フォトリソグラフィ、ドライエッチングなどの工程後に、切断 (ダイシング) 工程へと移る。従来、MEMS ウエハをチップ化するには接触方式であるダイヤモンドブレード (回転刃) が用いられている。このブレードを用いるダイシング工程では、接触方式であるため切断時に MEMS デバイスに負荷がかかる。更に、ブレードの冷却や切削粉の除去のために水をかける必要がある。しかし、ダイヤモンドなどを有する精密な MEMS 素子に水が浸入すると、汚染や破損が生じ歩留まりが大幅に低下する。このため、通常は MEMS ウエハのチップ化前に保護テープを施したり、レジストにより保護したりするが、これが MEMS の設計の大きな制約となる。また、回転ブレードによるダイシングでは、ブレード幅に相当する分割代とチップングが発生する領域が広いいため、ウエハ内でのチップ数が減少するという問題がある。これは、特に小型チップのコストに直結するため MEMS 実用化の障害となる。以上の背景から、ドライな環境でチップングなしに低ストレスダイシングする技術が求められている。

これまでに、レーザーアブレーションを用いた切断が検討されているが、デブリ (ゴミ) の発生や熱影響が懸念される。レーザーアブレーション切断の応用として、レーザーマイクロジェットという技術があるが、これは水の問題を避けられない。前述した問題を解決する手法として、ウエハ内部に改質層を発生させ切断するステルスダイシング技術が開発された。しかし、厚みのある試料や積層構造 MEMS への適用はできておらず装置が高額である。したがって、我々は MEMS の一般的な構成要素であるテンパックスガラスと Si のレーザー加工特性を調べた後、積層 MEMS をレーザーによってデブリなしに低ストレスで分割する技術の開発を行った。

1.2 低ストレスレーザーダイシング技術の開発

1.2.1 低ストレスダイシングの手順

本研究で行ったレーザーダイシングは3つの工程から構成されており、その概要を図1-1に示す。第1工程として、試料に対して透過性のある短パルスレーザーをウエハ内部に集光して内部クラックを形成する。続いて、このクラックがライン状につながるようにレーザーを走査させ内部加工ラインを作る。厚みのあるウエハに対しては厚さ方向にレンズのデフォーカス量を変化させて数回レーザー走査させ、数層の内部加工ラインを形成する。ここで、ウエハ表面がアブレーションしてデブリ（ゴミ）が発生しないように内部加工ラインの層数、レンズのデフォーカス量を調整する。また、形成された内部クラックによってレーザー光が散乱しエネルギーロスすることを避けるために、レーザー走査はウエハの底面から表面の順に行っていく。次に、第2工程として、ブレード等によって外部ストレスを加えることでウエハを内部クラック層に沿って完全に切断する。最後に第3工程としてテープエキスパンドを行いチップ間の隙間をあける。図1-2(a)に第3工程で用いたテープエキスパンダ装置（ヒューグルエレクトロニクス社製）を示す。本研究では、第1工程の前後どちらかで図1-2(b)に示すテープマウント装置（ヒューグルエレクトロニクス社製）を用いて、ウエハにダイシングテープを貼り付けている。テープエキスパンダ装置はダイシングテープの端をリングで固定し、ステージを上昇させることでテープを伸ばす。このテープが引張られる時に発生する引張り応力を利用して、個々のチップ間に隙間をあけている。第1工程で用いたレーザーダイシング装置、第2工程で用いたウエハ切断装置については第2章で詳しく述べる。

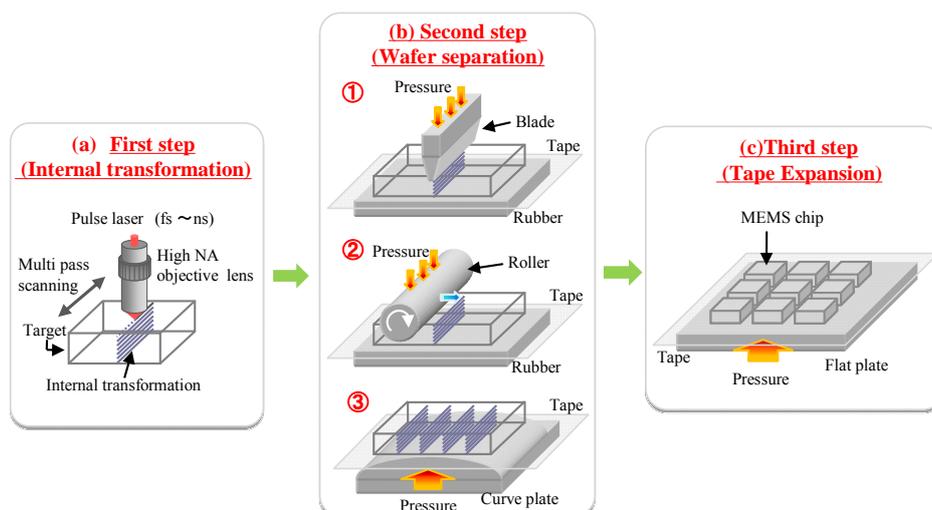
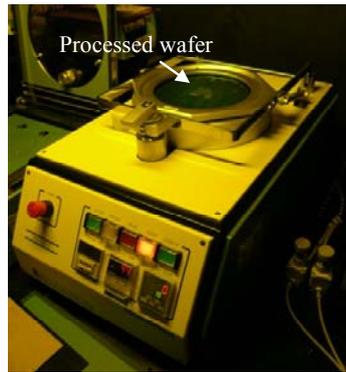
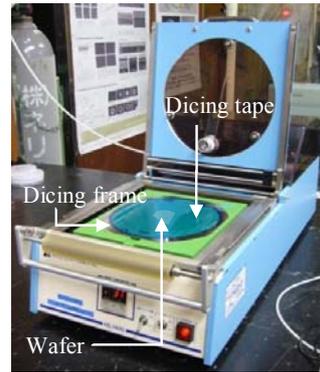


図1-1 低ストレスダイシングのプロセスフロー



(a) テープエキスパンダ装置



(b) テープマウント装置

図 1-2 テープエキスパンダ，テープマウント装置の外観

1.2.2 短パルスレーザーによるウエハの内部加工

レーザーでバンドギャップの大きいガラスの内部加工をする場合は，非線形現象である多光子吸収を起こす必要がある．物質の電離エネルギーや解離エネルギーに比べて，1光子のエネルギーが大きい場合は，図 1-3(a)のように1光子の吸収により物質の状態が変化する．この場合，吸収係数はレーザー光強度に依存せず，照射強度に比例してイオン数などは増加する．これに対して，図 1-3(b)，(c)のように1光子のエネルギーに比べて励起準位のエネルギーが大きい場合は，レーザー強度を大きくすると複数の光子を同時に吸収して遷移する多光子吸収が起こる．この多光子吸収には2つのケースがある．図 1-3 (b) に示される原子の光電離のように中間に共鳴準位が存在しない場合，電離に要する光子数を n とすると，吸収は光強度の n 乗に比例する．これに対して，図 1-3 (c) の分子振動のようにエネルギー準位が密な場合，段階的な吸収が起こるため励起準位に達するには n 個の光子が必要な場合でも，吸収は強度の n 乗には比例せず，強度依存性は n 乗に比べてかなり小さくなる．ガラスの内部クラックは図 1-3(b)の多光子吸収で起こるため，光強度の大きい短パルスレーザーが必要である．一方，Si の内部加工をする場合は，Si に対して吸収の少ない赤外域のレーザー波長を選択する．Si のバンドギャップは約 1.1eV であり，波長 1064nm のレーザーで内部加工をした場合，フォトンエネルギーが 1.17eV であるため図 1-3(a)の1光子吸収で加工が行われる．

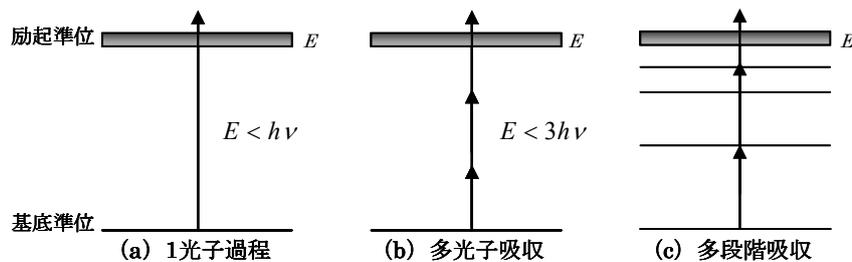


図 1-3 光の吸収過程

ウエハの内部加工をするには、ウエハの表面と内部集光点のエネルギー密度の関係も重要になる。ウエハ表面のレーザーエネルギー密度はアブレーション閾値以下、集光点は内部クラック形成閾値以上という条件を満たすには高 NA の対物レンズが必要になる。本研究では NA0.7 と NA0.8 の対物レンズを使用した。続いて、短パルスレーザーを NA0.8 の対物レンズでガラスや Si に内部集光した時の集光位置について述べる。図 1-4 にレンズのデフォーカス量に対する内部集光位置を示す。内部集光位置(内部加工位置) l はスネルの法則より以下のように導かれる。

$$l = n_2 \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{NA}{n_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{NA}{n_1}\right)^2}} \cdot d \quad (1-1)$$

ここで、 d はレンズのデフォーカス量、 n_1 は空気の屈折率、 n_2 は基板の屈折率、 NA はレーザーの入射 NA である。ガラスの屈折率は 1.5、Si の屈折率は 3.6、空気の屈折率は 1 としている。図 1-4 よりガラスの場合は屈折率が小さいため内部集光位置が基板内部に少し入り込む程度であるが、Si の場合は屈折率が大きいいため集光位置が基板内部に大きく入り込んでいることが確認できる。一例として式(1-1)を用いて、NA0.8 の対物レンズで $10\mu\text{m}$ デフォーカスした場合、ガラスの内部集光位置は $21.6\mu\text{m}$ 、Si の内部集光位置は $58.5\mu\text{m}$ となる。

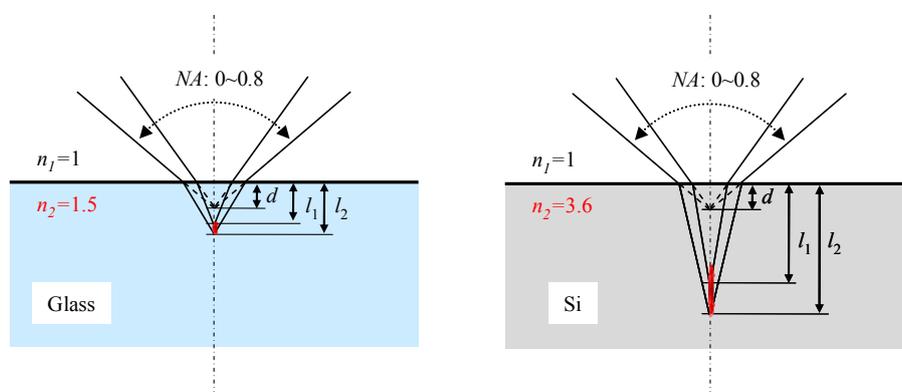


図 1-4 入射 NA と内部集光位置の関係

1.3 ガラスの熱応力割断

液晶パネル、プラズマパネルなど薄型ディスプレイの基板となるガラスの切断には、超硬ホイールによって表面にクラックを入れブレイクする方法と、レーザーによる熱応力を利用した方法¹⁻⁴⁾が用いられている。図 1-5 にレーザー照射による熱応力割断の原理を示す。割断プロセスとしては、割断予定ラインに端にホイールやレーザーで初期亀裂を形成する。そこに CO₂ レーザー (波長: $10.6\mu\text{m}$) を照射し、割断ラインに沿って走査させる。この時、

ガラス表面にレーザー光が吸収され、表面は融点以下の温度まで加熱される。ガラスには熱膨張に伴って照射域では圧縮応力、その周辺では引張り応力が発生する。この引張り応力は照射部を中心とした円周方向に作用するため、引張り応力場内にある初期亀裂はレーザー照射部中心に向かって進展していき切断される。また、このプロセス中に冷却源を同時に走査することで、引張り応力が大きくなり切断プロセス時間の短縮ができる。この技術の利点としては、きれいな切断面が得られる点とクラックを入れてブレイクする方式にはできない自由曲線で切断できる点である。欠点としては、引張り応力が加わりにくい細い幅の切り出しが困難であることが挙げられる。

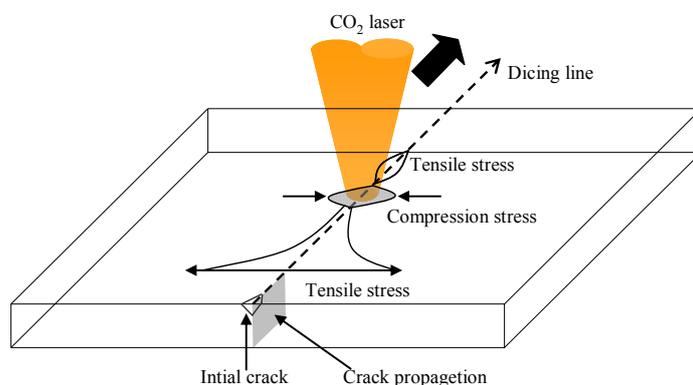


図 1-5 ガラスの熱応力切断

参考文献

1. 林正和：レーザー式ガラス切断装置の開発，芝浦メカトロニクス技報(2007-1)
2. 黒部利次：YAG レーザーによる精密切断技術，精密工学会誌，Vol.65，No.11，(1999)
3. 上田隆司：切断における温度計測，レーザー加工学会誌，Vol.12，No.1(2005)
4. 才元明秀，今井康文，森田英毅：き裂面加熱に伴う反無限き裂の熱応力拡大係数，日本機械学会論文集(A 編)，62 巻 597 号(1996-5)

第2章 低ストレスレーザーダイシング装置の開発

2.1 高速レーザー加工装置

波長 $1\mu\text{m}$ のレーザーによる Si の内部クラック形成は 1 光子吸収による熱影響に基づいている¹⁾。これに対して、ガラスの内部クラック形成には多光子吸収を利用する。N 次の多光子吸収では吸収の強さは入射光強度の N 乗に比例するため、高強度である短パルスレーザーがガラスの内部クラック形成に適している。そこで本研究では、光学特性の異なるガラス、Si 共に内部加工を施すため、短パルスレーザーである Nd:YVO₄ レーザー (MEGAOPTO 社製) を用いた。Nd:YVO₄ は YVO₄ 結晶中の Y³⁺ を Nd³⁺ に置換した結晶である。発振波長は $1.0643\mu\text{m}$ と Nd:YAG レーザーの $1.0641\mu\text{m}$ に近い値となっている。Nd:YVO₄ レーザーは、発振閾値が低く発振が容易であり、LD 励起に適しているため小型である。また、上準位の蛍光寿命が比較的短く高繰り返し発振に適しているため、高速レーザーダイシング装置に組み込んだ。波長は 1064nm 、パルス幅は 10ns 、繰り返し周波数は $10\text{kHz}\sim 100\text{kHz}$ で任意に設定可能である。加工条件の最適化を行うためにその他のレーザーとして、Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm , パルス幅: 100fs , 繰り返し周波数: 1kHz , SpectraPhysics 社製), Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波 (波長: 532nm , パルス幅: 10ns , 繰り返し周波数: $10\sim 100\text{kHz}$, MEGAOPTO 社製), Yb ファイバーレーザー (波長: 1064nm , パルス幅: 200ns , 繰り返し周波数: $10\sim 100\text{kHz}$, SPI 社製) も用いた。

使用したレーザー加工装置の概略図を図 2-1 に示す。加工用のレーザーを各レーザー波長に対応したミラーで打ち下ろし、NA0.8 の対物レンズを通して試料に照射する。試料の固定にはステージ上に設置された真空ポーラスチャックを用いる。観察系としては基盤の歪み

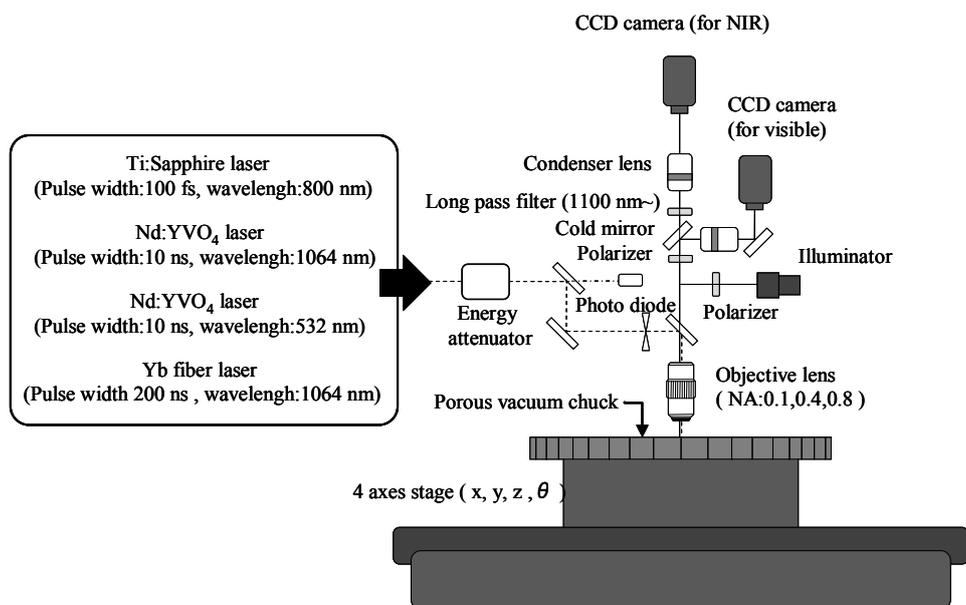


図 2-1 高速レーザー加工装置の概要

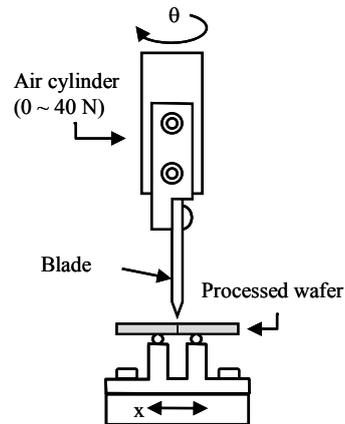
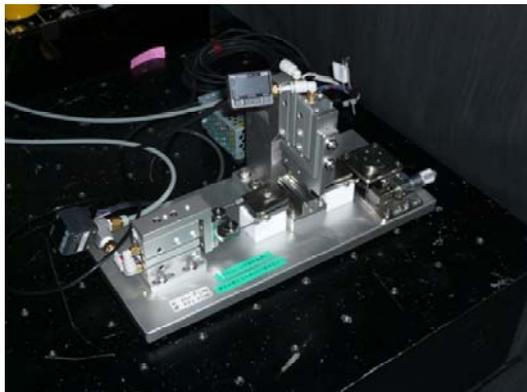


図 2-2 最大曲げ応力評価装置

を見るための偏光顕微鏡機能, Si の内部加工を見るための赤外顕微鏡機能を搭載している。加工ステージは 4 軸のものを用いており, 最大速度が X・Y 軸 : 700mm/sec, Z 軸 : 100mm/sec である。XY ステージのストロークは 300mm と 6 インチウエハに対応しており, 大口径ウエハの高速ダイシングが実証できる。ステージの繰り返し位置決め精度は $\pm 500\mu\text{m}$, Z 軸ステージの分解能は 100nm である。レーザーのエネルギー調整は半波長板と偏光子を組み合わせることでエネルギー源衰器を作製し用いた。本装置を用いて, 図 1-1 に示す第 1 工程のレーザー加工を行った。

2.2 曲げ応力測定装置

内部加工を施した試料は外部ストレスを加えることで完全にチップ化されるが, 脆弱構造を有する MEMS ウエハは出来る限り低ストレスに切断する必要がある。この切断条件の最適化を行うために, 図 2-2 に示す 3 点曲げ応力装置を設計しウエハの分離に必要な最大曲げ応力を測定した。装置の支点間距離は 10mm, ブレード先端の幅は $200\mu\text{m}$, ブレードにかかる圧力はエアシリンダーによって供給される。試料に形成された内部加工ラインとブレード先端が沿うように x 軸と θ 軸で位置調整を行った。曲げ応力測定に使用した評価試料サイズは, Si が厚み $300\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$, テンパックスガラスが厚み $500\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$, ガラス/Si 接合ウエハが厚み $300\text{-}300\mu\text{m}$ で $6 \times 20\text{mm}$ である。ガラスと Si の接合には陽極接合技術を用いた。この原理は, $300\text{-}500$ 度で加熱すると同時にガラス側を陰極, Si 側を陽極として高電圧をかけることで, ガラス中の陽イオンを陰極側に強制的に拡散させ, ガラスと Si の間に静電引力を発生させて密着を促すとともに, ガラスと Si を化学反応によって結合させている。接合最大曲げ応力 σ_{max}^2 [MPa] は以下の次式より求めた。

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{Z} \quad (2-1)$$

$$M = \frac{F}{2} \cdot \frac{l}{2} \quad (2-2)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6} \quad (2-3)$$

ここで、 M は曲げモーメント、 Z は断面係数、 F は試料に加えた圧力、 l は支点間距離(10mm)、 b は奥行き方向の試料幅(6mm)、 h は試料厚み(Si: 300 μ m, テンパックスガラス: 500 μ m, 接合ウエハ: 600 μ m)である。

2.3 ウエハ分割装置

2.3.1 ブレイク装置

図 1.1 の第 2 工程(a, b)でウエハの割断に用いるブレイク装置について述べる。初めに、(a) ブレードを用いた場合の装置概要を図 2-3 に示す。ブレードは 1~9 枚まで重ねて使用することができ、複数のブレードを利用することでチップ化の効率が上がる。ブレードの押し当て方は図 2-4 に示す 2 つの方式を用いた。図 2-4(a)はウエハの表面にブレードを押し当てる接触方式であり、下にあるスポンジと挟み込むことで大きな力が加えられる。図 2-4(b)は空中に浮いており、テープ側から押し込むため非接触であるが、加えられる力が弱くなる。また、この方式ではブレードの押し込み量が増えるとテープが裂けたり剥がれたりした。そこで、図 2-5 のようなローラー式のブレードを用いて、局所的に割断を行うことでテープ剥がれの問題を解決した。ウエハの割断方法はそれぞれウエハの状態に合わせて最適な方式を選択し用いた。

ブレードを用いたチップ化の手順としては、Y 軸方向のウエハ内部加工ラインとブレードが沿うように CCD カメラでアライメントを行う。そして、Z 軸方向にブレードを押し込むことで亀裂を進展させ短冊状に割断する。その後、 θ 軸を用いて 90 度回転させ X 軸方向に対しても割断を行いチップ化する。ローラーを用いた場合には図 2-5 に示すように Z 軸方向に押し込んだ後、内部加工ライン方向にスキャンさせることで割断を行っている。

2.3.2 球面テープエキスパンダ装置

テープエキスパンダ装置は、ウエハ固定のために使用するダイシングテープを引張ることで発生する引張り応力を利用してチップ間に隙間をあける。通常、この装置はブレードダイシング等の手法で、完全に切断されたウエハに対して用いられる。本研究においても、図 1-9 に示すようにブレイク装置で割断を行った試料に対して第 3 工程で用いている。そこで、プロセスの簡略化として、第 2 工程、第 3 工程を同時に行うために、引張り応力だけでなく、縦方向に曲げ応力も加えられる球面テープエキスパンダ装置を開発した。図 2-6 にこの装置の外観を、図 2-7 にプロセス手順を示す。

プロセス手順としては、初めに、ダイシングテープを伸ばしやすくするためにヒーターで

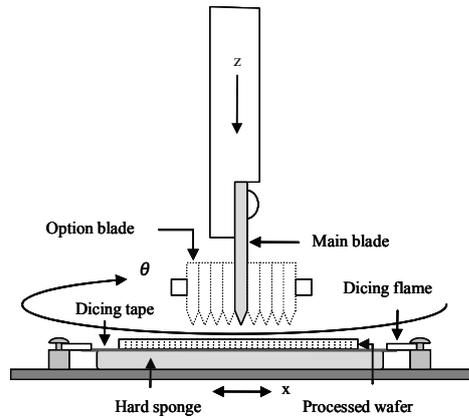
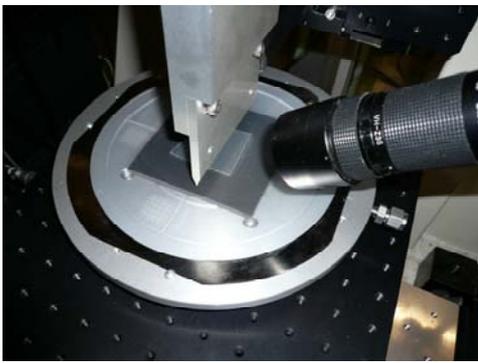


図 2-3 ブレードを用いたウエハ自動分割装置

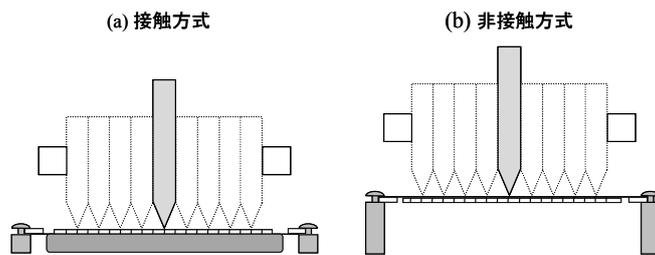


図 2-4 ブレードによる分割方法

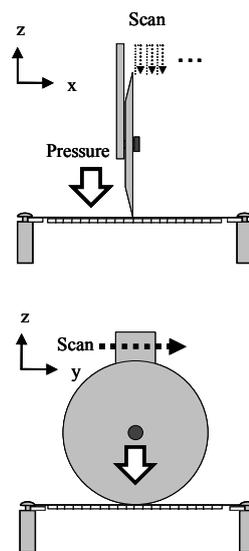
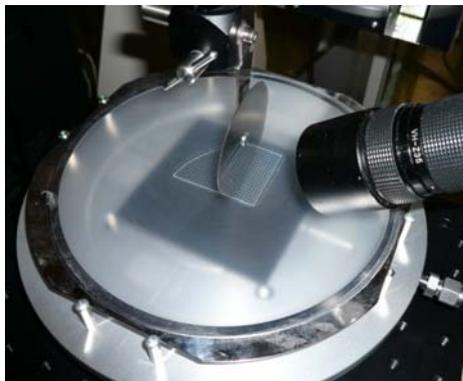


図 2-5 ローラーを用いたウエハ自動分割装置

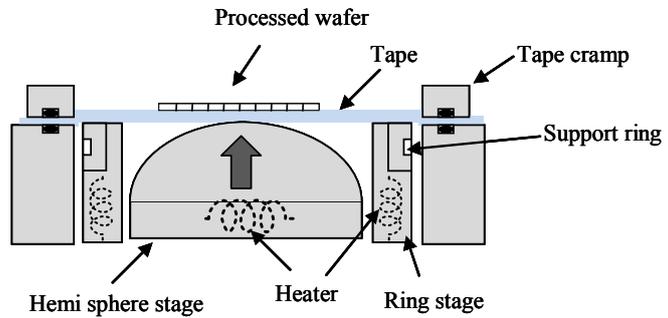
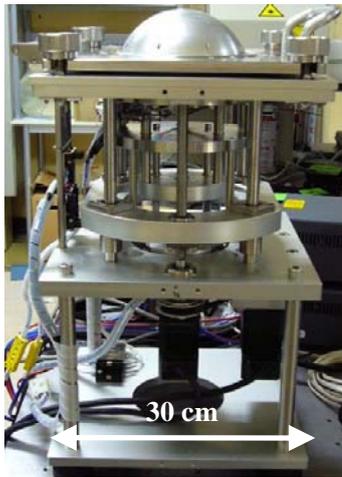


図 2-6 球面テープエキスパンダ装置の概観

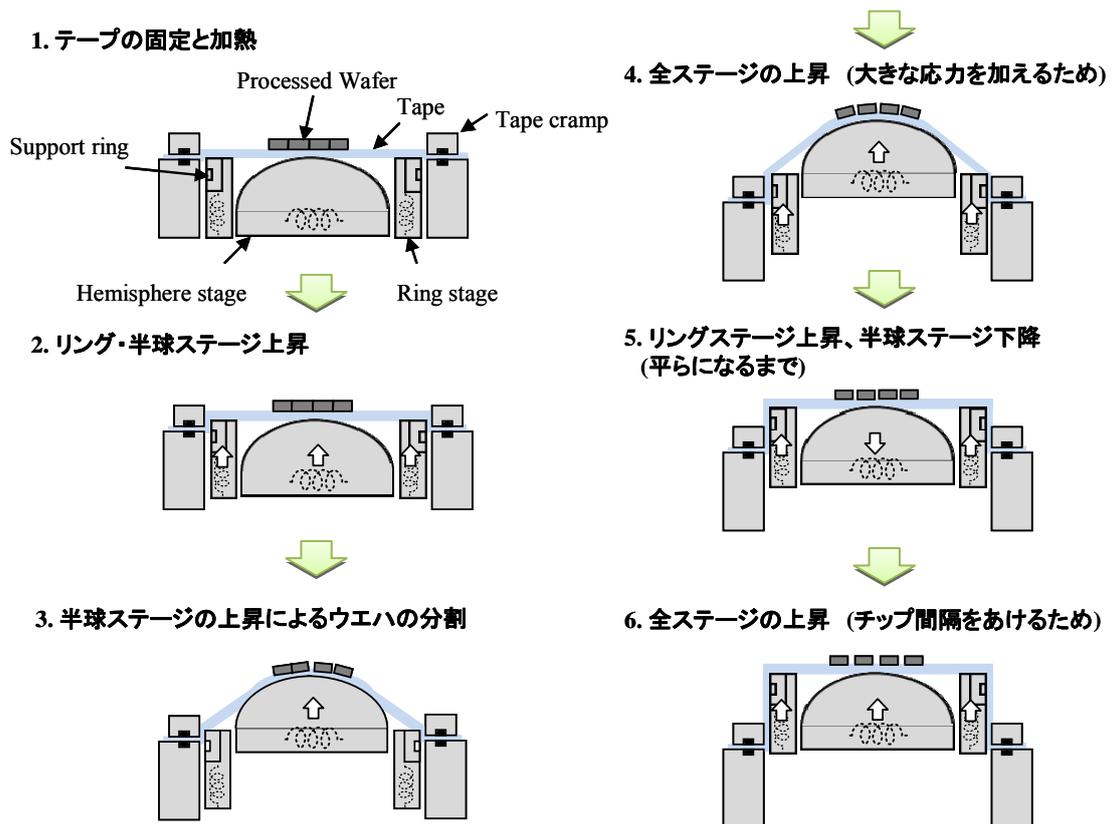


図 2-7 球面テープエキスパンダ装置のウエハ分割手順

加熱 (60°C) を行う。加熱後、外側のリングと半球のステージが上昇して、通常のエクスパンダ装置と同様に引張り応力を加える。弱い力で切断されるウエハはこの過程で完全にチップ化される。チップ化されない場合は、中央から半球ステージが上昇し、ウエハに対

して縦方向の曲げ応力が加えられチップ化される。また、途中から更に応力を加えるためにリングステージも上昇する。完全にチップ化すると、外側のリングがそのまま上昇してチップ間の隙間を広げつつ、曲面ステージが下降し、最終的に平らな状態でテープにマウントされたチップが得られる。この装置には、粘着力が 20N/25mm と強力な UV 剥離タイプのダイシングテープ(ウノン技研製)を用いた。これは、球面ステージでテープ側から曲げ応力を加えると、粘着力が弱い場合には、ウエハがテープから浮き上がってしまい力が伝わらなくなるため、強粘着なテープを使用した。

参考文献

1. T.Monodane, E.Ohmura, “Thermo-Elastic -Plastic Analysis on Internal Processing Phenomena of Single-Crystal Silicon by Nanosecond Laser”, in *Proceedings of LAMP 2006*, Kyoto, May 16-19, 2006, #06-125.
2. 須藤一：材料試験法, p.61 (2002)

第3章 パルスレーザー照射による内部クラック形成実験

3.1 テンパックスガラスに形成される内部クラック形状

表 3-1 に示す物性値をもったテンパックスガラスに対して、パルス幅の異なるレーザーを照射し、形成される内部加工の比較を行った。テンパックスガラスはドイツ、ショット社の製品で、耐熱ガラスとして有名なパイレックスガラス(アメリカ、コーニング社)と同等の特徴をもっている。パイレックスガラスが生産中止となったため、本製品を実験に用いた。レーザーには Nd:YVO₄ レーザー (波長: 1064nm, パルス幅: 10ns), Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm, パルス幅: 200ps), Ti:sapphire レーザー (波長: 800nm, パルス幅: 100fs) の 3 種類を使用した。レーザー光を NA0.7 の対物レンズでガラス内部に集光し、シングルパルス照射して形成されるクラック形状を観察した。シングルパルスの切り出しにはメカニカルシャッターを利用した。

ナノ秒レーザー, ピコ秒レーザー, フェムト秒レーザーで形成した内部クラックを上部からレーザー顕微鏡で観察した結果を図 3-1 に示す。上段は加工閾値近くのエネルギーを照

表 3-1 ガラス物性値の比較

	熱膨張係数 (0~300°C) × 10 ⁻⁷ [°C ⁻¹]	熱伝導率 [W/m/K]	比誘電率 (25°C, 1MHz)	屈折率 (589.3nm)	ポワソン比	ヤング率 × 10 ³ [kg/mm ²]
テンパックスガラス 厚み: 500 ± 10 μm (ホウケイ酸ガラス)	32.1	1.2	4.8	1.472	0.22	6.42
パイレックスガラス (ホウケイ酸ガラス)	32.5	1.1	4.6	1.474	0.2	6.68
ソーダライムガラス	93.5	1.0	7.0	1.523	0.23	7.20

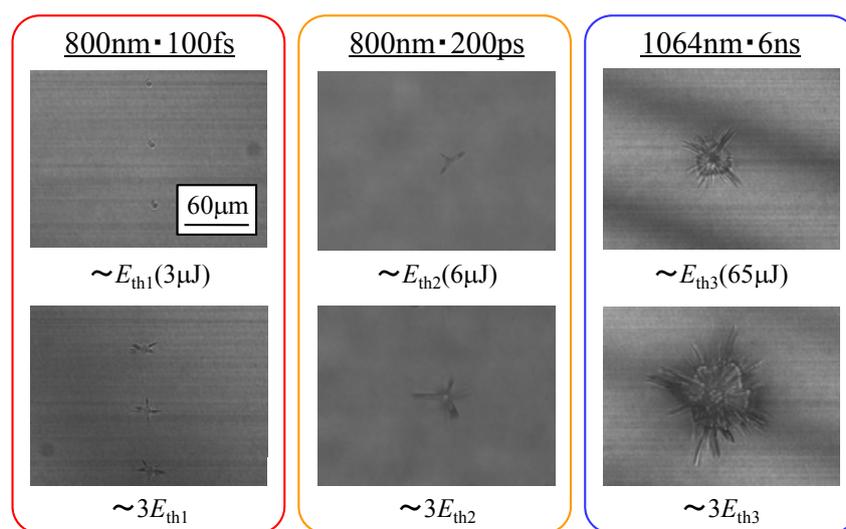


図 3-1 レーザーパルス幅の違いによる内部クラック形状比較(LSM 像)

射した結果で、下段は加工閾値の約 3 倍のエネルギーを照射した結果である。それぞれの加工閾値エネルギーは Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) は 80μJ, Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 200ps) は 6μJ, Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 100fs) は 3μJ となり、パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーは多光子吸収が起こりやすいため、加工閾値エネルギーが低くなったと考えられる。加工閾値エネルギーで形成される内部クラック形状は、Nd:YVO₄ レーザーの場合、集光点からほぼ等方的に約 30μm のマイクロクラックが発生しており、内部クラック幅は約 60μm であった。一方、パルス幅 100fs の Ti:sapphire レーザーの場合は多光子吸収が起きやすく、少ないエネルギーで加工できるため熱影響が抑えられ、集光点のみに局所的なクラックを形成できた。その内部クラック幅はナノ秒レーザーに比べて 1 桁低い 5 μm 程度であった。

図 3-2 に内部クラック幅の照射エネルギー依存性を示す。このグラフにおいて Nd:YVO₄

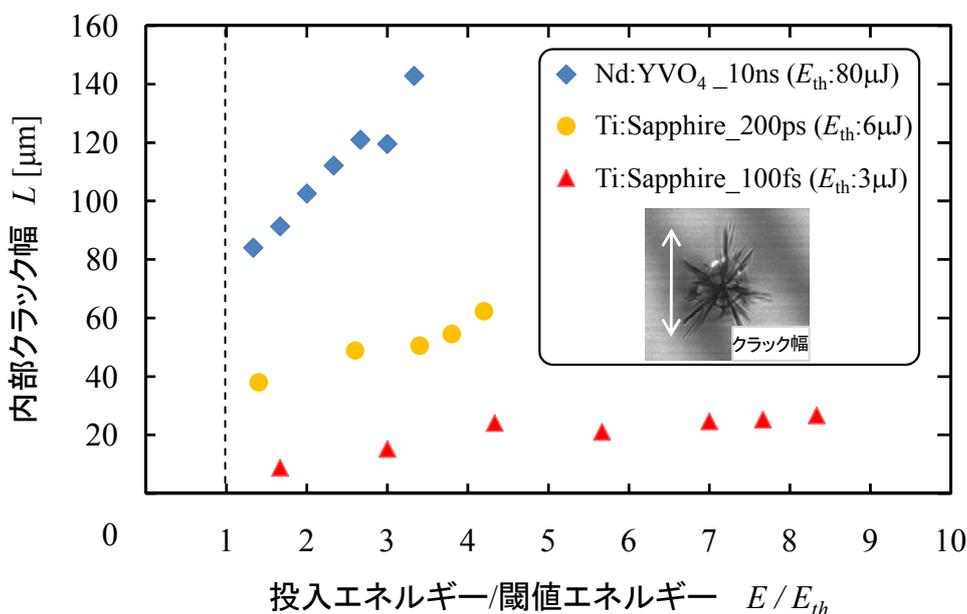


図 3-2 内部クラック幅のパルス幅依存性

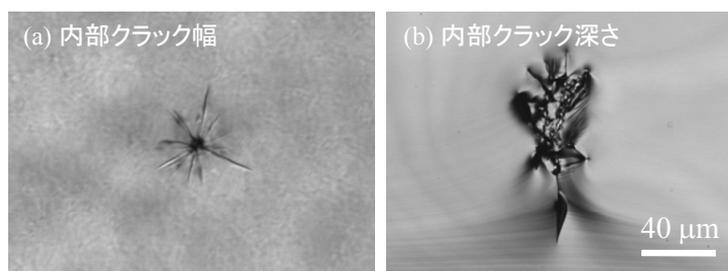


図 3-3 Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) で形成される内部クラック形状

レーザーの場合、集光点から等方的にマイクロクラックが発生するため、中心から端までの距離を平均して 2 倍したものを内部クラック幅と定義している。グラフの横軸には投入エネルギーを加工閾値エネルギーで割った値を示している。投入エネルギーの増加に伴い内部クラック幅が増加しており、パルス幅が短いほど小さい内部クラックを形成できた。また、試料の厚み方向に形成される内部加工ライン深さも調べた。内部クラック層を 1 ライン形成したガラスの断面をレーザー顕微鏡で観察した。図 3-3 にナノ秒レーザーで形成された(a)内部クラック幅 (シングルパルス)、(b)内部加工ライン深さを示す。加工閾値エネルギーの 1.5 倍のエネルギーを投入すると、ナノ秒レーザーの場合は $100\mu\text{m}$ 、フェムト秒レーザーの場合は $10\mu\text{m}$ の内部クラック深さとなることから、ガラスに形成される内部クラックのアスペクト比は約 1.5~2 であることが分かった。以上の結果から、パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーは内部クラックを小さく形成できるため、ダイシング幅を狭く抑える可能性を示しており優位な点といえる。しかし、ダイシングにおいては内部クラックがつかないようにレーザーの走査速度を決定しなければならない。つまり、レーザーの走査速度は内部クラックの大きさとレーザーの繰り返し周波数によって決定されるため、Ti:sapphire レーザーを用いた場合は Nd:YVO₄ レーザーに比べて大幅に時間がかかる。特に厚みのある MEMS ウエハに対しては、深さ方向にも数回レーザー走査させるため Nd:YVO₄ レーザーの方が有効である。例えば、平均出力 10W、繰り返し周波数 20kHz の Nd:YVO₄ レーザーを用いた場合、 $80\mu\text{m}$ の内部クラックをつなげるようにレーザー走査すると 1 ライン当たり 1600mm/sec の加工が可能である。厚さ 1mm のガラスウエハに対しては深さ方向に数ライン走査する必要があるが、これを考慮してもブレードダイシングと比べてかなり高速である。また、レーザー装置の価格も 1桁違うため Nd:YVO₄ レーザーの方が実用的であるといえる。

3.2 Si に形成される内部クラック形状

表 3-2 に示す物性値をもった Si ウエハに対して、透過性のある Nd:YVO₄ レーザー (波長: 1064nm, パルス幅: 10ns) を用いて内部加工を行った。レーザー光を NA0.8 の対物レンズで Si 内部に集光し、図 3-4 に示すようにレンズのデフォーカス量を深さ方向に $5\mu\text{m}$ ずつ変化させレーザー加工を行った。内部加工ライン幅のレーザーエネルギーによる変化を図 3-5 に示す。それぞれの左図が上部から赤外顕微鏡で内部加工ラインを観察したもの、右図が図 3-4 の Y 軸方向に Si ウエハを切断して、断面を光学顕微鏡で観察したものである。赤外顕微鏡像で確認できる黒い線は表面アブレーションで、薄い線が内部加工ラインである。照射エネルギーの増加に伴い表面アブレーションする領域が増えている。しかし、内部加工ライン幅はエネルギーの増減によらずほぼ一定で約 $5\mu\text{m}$ であることが分かった。また、ガラスの場合に発生したマイクロクラックも確認されなかった。断面図からは、Nd:YVO₄ レーザーを用いることで深さ方向全面に内部加工が形成できることが確認できる。この断面の内部加工ライン深さをレーザー顕微鏡で観察した結果を図 3-6 に示す。照射エネルギーを $10\mu\text{J}$ 以上にすると内部加工ライン深さが飽和し、その時のサイズは約 $70\mu\text{m}$ である。以

上の結果から、Si ウエハにエネルギー10 μ J 投入した場合、内部加工ライン幅が約 5 μ m、内部加工ライン深さが約 70 μ m とアスペクト比の高い加工形状が得られることが分かった。

表 3-2 Si ウエハの物性値

	結晶成長法	タイプ	ドーパント	結晶軸方位	厚み	抵抗率	熱伝導率
Si (両側鏡面)	CZ	N	Phos	100	300 \pm 10 μ m	10~20 [Ω ·cm]	168 [W/m/K]

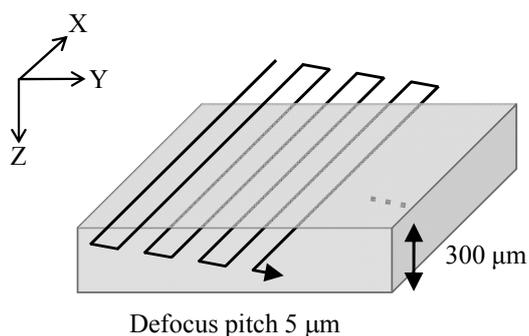


図 3-4 Si ウエハのレーザー加工方法

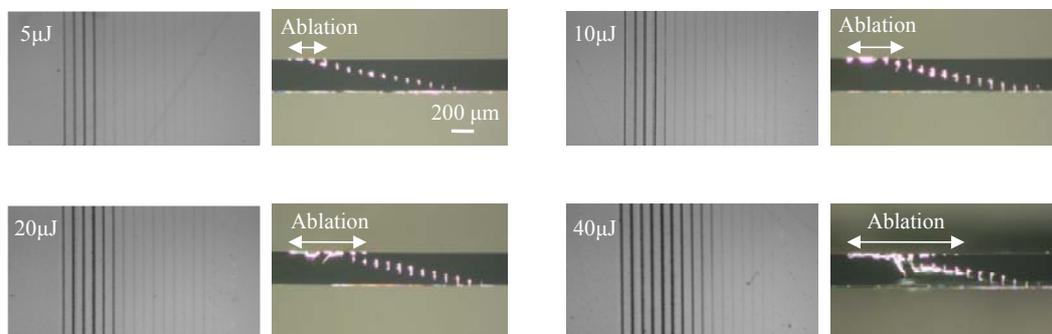


図 3-5 Si ウエハに形成された内部クラック幅(赤外顕微鏡像)と内部加工断面写真(光学顕微鏡像)

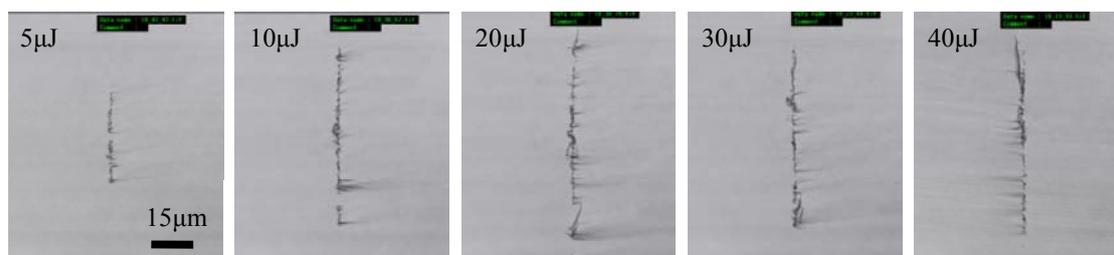


図 3-6 内部加工ライン深さの照射エネルギー依存性

ガラスと比較して、このような高アスペクト比な加工形状が得られるのは、Si の屈折率が 3.6 と大きいためである。第 1 章の図 1-12 に示すように、ガラスに比べて屈折率が高い分、ウエハの内部で集光 NA が小さくなり焦点深度が伸びたため長尺な加工形状になったと考えられる。また、ガラスに比べて投入エネルギーも小さいため熱影響が抑えられ、クラックが横方向に広がらなかったと考えられる。

3.3 透過波長レーザーによる Si の内部加工

波長 1550 nm のレーザーは Si に対して透過性を持っているので内部加工ができる可能性がある。本節では波長 1550 nm、パルス幅 1 ps および 200 ps の Er ファイバーレーザーによる Si 内部加工特性について述べる。表面に関しては図 3-6 に示すようにパルス幅 1ps でもパルス幅 100 fs の時と同じように、c-Si 表面にアモルファス化を発生させることは可能であった。

図 3-7 のように、デフォーカス量を 5 μm ずつシフトさせるプログラムを作成し、NA 0.8 の対物レンズを用いて、内部集光を行った。照射エネルギーは 0.65 μJ であった。図 3-8 に加工部の透過型近赤外顕微鏡像を示す。パルス幅 1 ps の場合、アブレーションの発生を確認することはできるものの、内部加工を観察することはできなかった。一方パルス幅が 200 ps の場合は内部加工がしっかりと発生しているのが分かる。図 3-9 にそれぞれの加工部を劈開して断面観察を行ったものをしめすが、パルス幅 1 ps の場合は何も確認することができなかった。200 ps の場合は、ウエハの深部まで内部加工されていることが見て取れる。このことから、パルス幅 1 ps の場合はウエハ内部に加工に十分なエネルギーを伝えることができていないと思われる。フェムト秒レーザー加工が起こる場合、レーザーが当たったとほぼ同時にキャリアの励起が発生し、その吸収係数が大幅に増加する。内部加工を行う場合、集光点に達するまでに Si ウエハを通過するので、そのたびに多くのエネルギーをロスすることになる。このため、超短パルスレーザーは Si の内部加工には不向きであることが明らかになった。

パルス幅 200 ps で加工した断面の結晶構造を確認するため、EBSD (Electron Back Scatter Diffraction) 観察を行ったが、その方位は元の Si 基板と同じであった (図 3-10)。このことから、内部加工においても 200 ps のロングパルスではアモルファス化は発生しないことが分かった。

3.4 まとめ

テンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) と Ti:sapphire レーザー (パルス幅 : 200ps, 100fs), Si に対して Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅 : 10ns) を用いた結果、ウエハ内部にクラックを形成できた。

テンパックスガラスの場合、パルス幅の短い Ti:sapphire レーザーを用いることで内部クラックサイズを 10 μm 程度に抑えることができるため、精密なダイシングが行える。Nd:YVO₄

レーザーで形成される内部クラックは Ti:sapphire レーザーと比較すると大きいですが、その分、レーザー加工を高速にできるため、ダイシングに要する時間が短くできる利点がある。また、ガラスに形成される内部クラックはアスペクト比 1.5 程度であった。

Si の場合、透過性のある Nd:YVO₄ レーザーを用いることで内部クラックを形成でき、ダイシング幅 5 μ m とガラスに比べて極めて細い幅となった。また、屈折率の影響により形成される内部加工のアスペクト比がガラスに比べて高くなることがわかった。

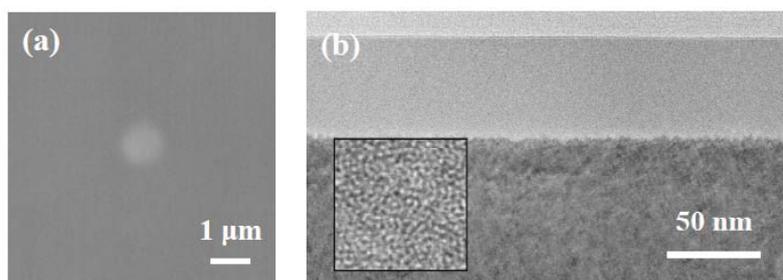


図 3-6 パルス幅 1ps の Er ファイバーレーザーによって発生した c-Si のアモルファス化. (a) 表面のレーザー顕微鏡写真, (b)断面の TEM 像

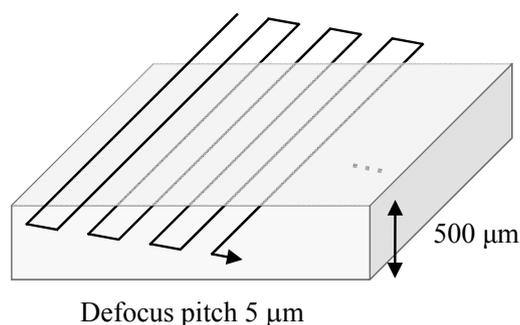


図 3-7 内部加工条件だしプログラムの一例

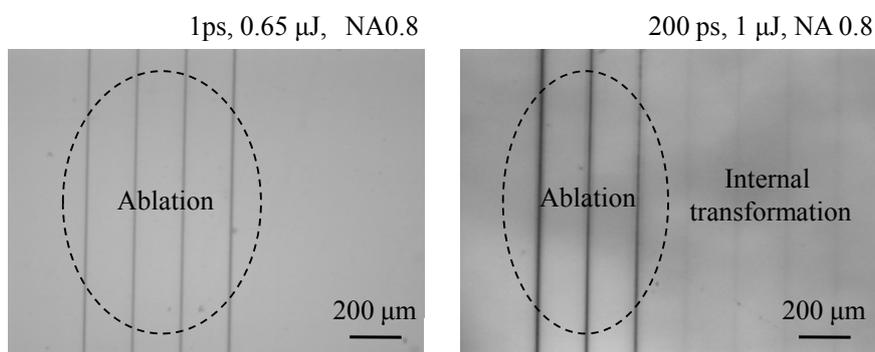


図 3-8 透過型近赤外顕微鏡による Si 内部加工の観察.

右図：レーザーパルス幅 200 ps, 左図：レーザーパルス幅 1 ps.

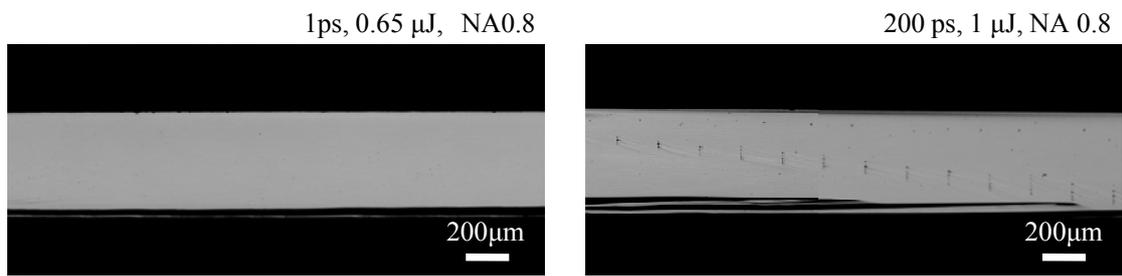


図 3-9 図 3-8 のレーザー加工部の劈開箇所におけるレーザー顕微鏡像

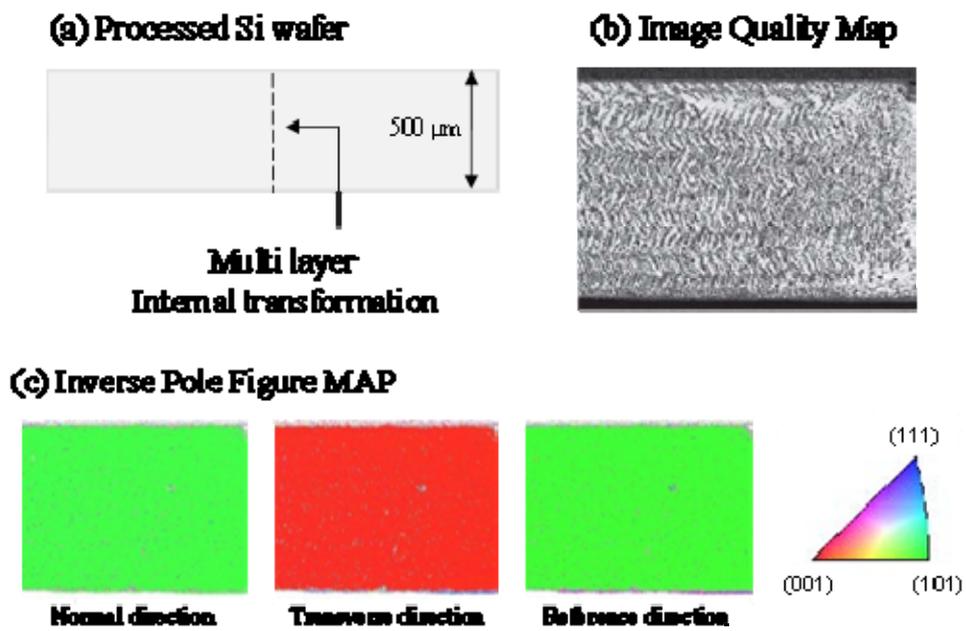


図 3-10 パルス幅 200 ps の Er ファイバーレーザーによる c-Si 内部加工断面の EBSD 観察結果

第4章 ウエハの割断に必要な曲げ応力測定結果及び 熱応力割断結果

4.1 はじめに

第3章に示した内部クラックを利用し、テンパックスガラス、Si ウエハ、テンパックスガラス/Si 接合ウエハに対して低ストレスレーザーダイシングを行った。レーザーは加工速度が速くできる、価格が安い、1台のレーザーで光学特性の異なるガラス・Siを共に内部加工できる点から Nd:YVO₄ レーザー（波長：1064nm、パルス幅：10ns、繰り返し周波数 10～100kHz）を用いた。レーザー加工した試料に対して、割断に必要な最大曲げ応力を第2章に示す応力評価測定し、最適な加工条件を見つけた後、実デバイスである評価試料（圧力センサ）を割断した。以下にそれらを示す。

4.2 ガラスの割断結果

4.2.1 テンパックスガラスの割断に必要な曲げ応力測定

テンパックスガラス（厚み：500 μ m）に対して、Nd:YVO₄ レーザー（パルス幅：10ns）を NA0.8 の対物レンズで集光し内部加工ラインを形成する。この時、低ストレスに割断するためにできるだけ表面近くに内部加工を行い表面へ亀裂を進展させた。この表面亀裂が割断の起点になるため、低ストレスを加えるだけでウエハがダイシング予定ラインに沿ってきれいに割断される。図4-1に試料表面から内部に向けてのレンズのデフォーカス量と表面に発生した亀裂の関係を示す。レーザー照射条件は、エネルギー125 μ J、繰り返し周波数 20kHz、レーザー走査速度 100mm/sec である。レンズのデフォーカス量が小さいとウエハの一部が欠けたり、亀裂が蛇行したりするため高品質なダイシングができない。デフォーカス量を増やすと亀裂の蛇行が減少し、デフォーカス量 70 μ m の時に直線状の亀裂が得られた。直線状の亀裂はレンズのデフォーカス量 70 \pm 20 μ m の範囲で発生する。

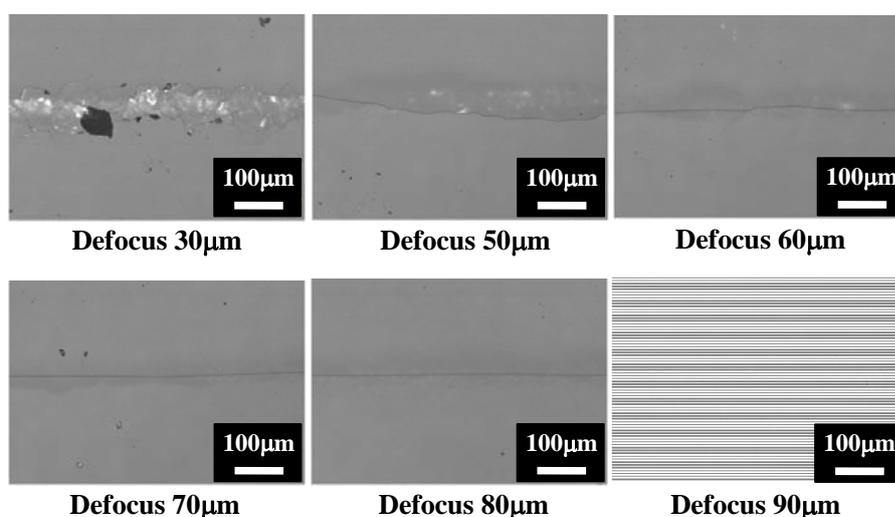


図4-1 レンズのデフォーカス量と表面亀裂の関係

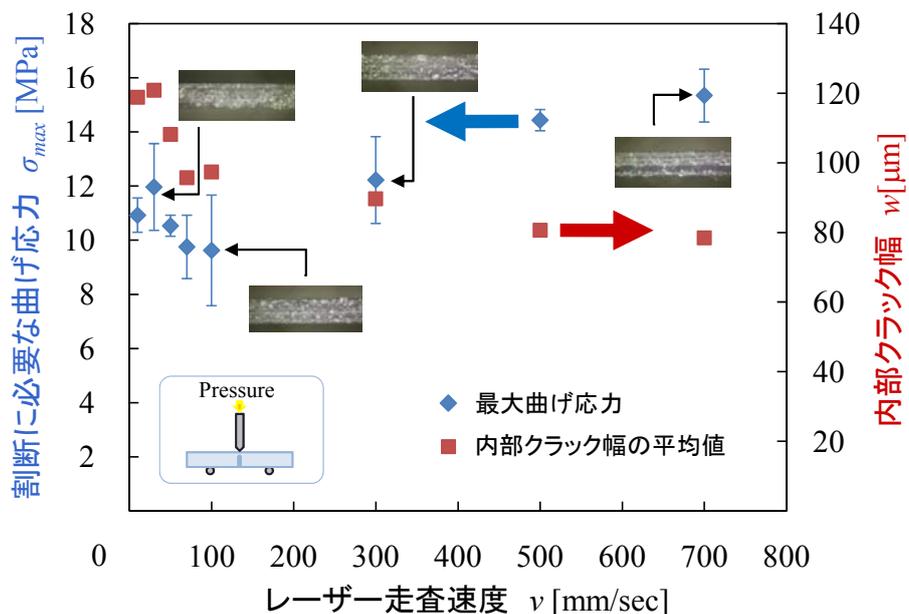


図 4-2 加工線幅と曲げ応力のレーザー走査速度依存性

この直線状の亀裂を利用して、ウエハの割断に必要な曲げ応力の測定を行った。図 4-2 に加工線幅と曲げ応力のレーザー走査速度依存性を示す。ウエハ加工条件は、エネルギー125 μJ 、繰り返し周波数 20kHz、レーザー走査速度 10~700mm/ssec であり、ウエハの厚さ方向全体に内部加工がつながるようにレンズのデフォーカス量を 65 μm ずつ変化させ 5 層レーザー加工した。評価試料サイズは、テンパックスガラス（厚み：500 μm ）の 6 \times 20mm であり、各条件ごとに 5 サンプル測定した。走査速度の減少に伴い、内部クラックが重なり成長するため加工線幅が増加している。一方、曲げ応力は多少の増減はあるが、全てにおいて 15MPa 以下と低い値を示しており低ストレスに割断できることがわかった。レーザー走査速度が 100mm/sec の場合に、曲げ応力は 9.5MPa と一番低い値を示している。そこで、最上層と最下層のレーザー加工位置を固定して、その間の層数を 0~35 層と変化させて曲げ応力を測定した結果を図 4-3 に示す。全ての場合において 18MPa 以下と低い値を示していたが、3 層以上加工した場合には、曲げ応力は 10MPa 程度と値が飽和した。加工線幅は層数が増える毎に増加していく。5 層加工した場合の線幅は 95 μm に対して、2 層加工した場合の線幅は 60~70 μm 程度とシングルパルスで形成されるクラックとさほど変わらないことがわかった。これは深さ方向のクラックが重ならなかったためと考えられる。ガラスの割断において層数は、厚さ 150 μm ごとに 1 層程度で十分低ストレスに割断ができる。また、加工線幅を極力細くしたい場合は、深さ方向のクラックが完全に重ならないように層数を設定することで達成できる。図 4-4 に走査速度 100mm/sec で 5 層レーザー加工し、3mm 角のチップに切り出したテンパックスガラスを示す。レーザーを円形に走査させた場合には、図 4-5 のようなテンパックスガラスの円形カットも可能であった。

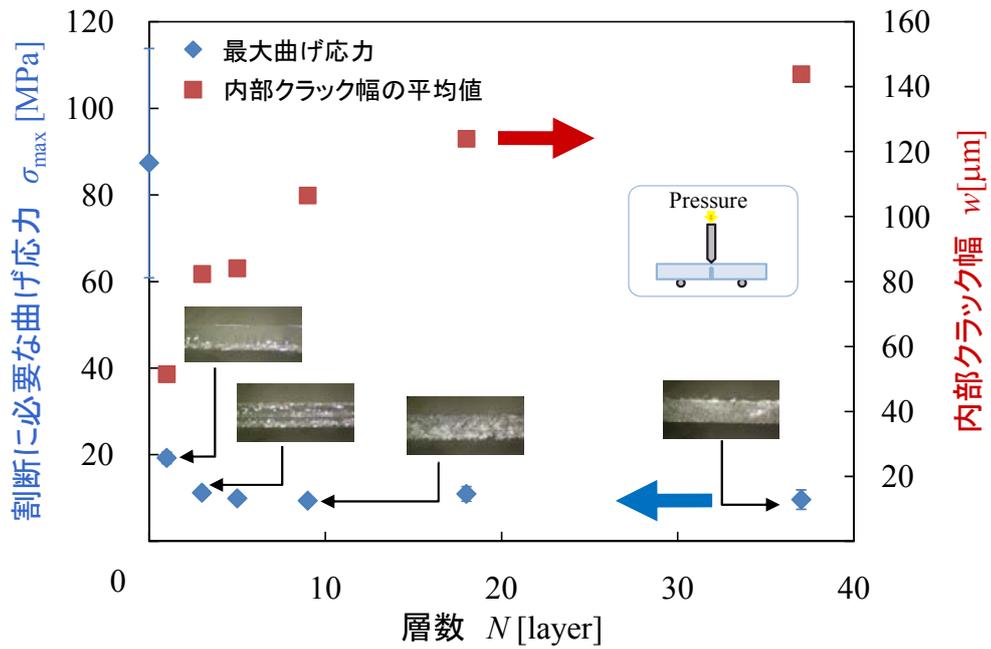


図 4-3 加工線幅と曲げ応力の内部加工層数依存性

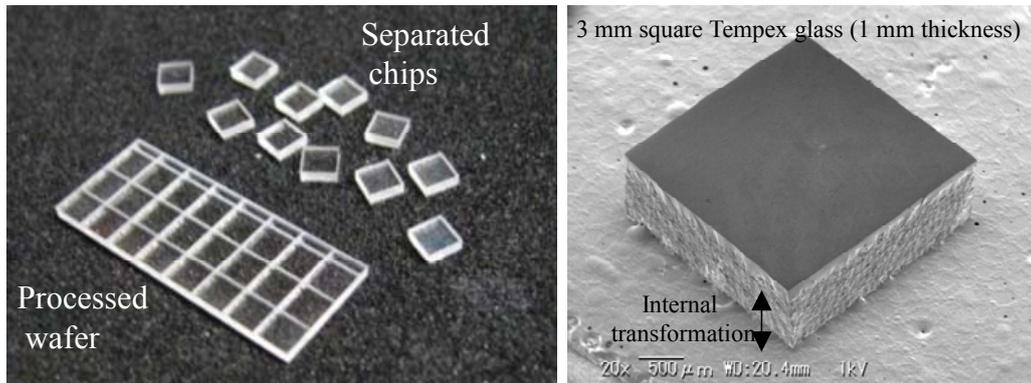


図 4-4 3 mm角にチップ化したテンパックスガラス

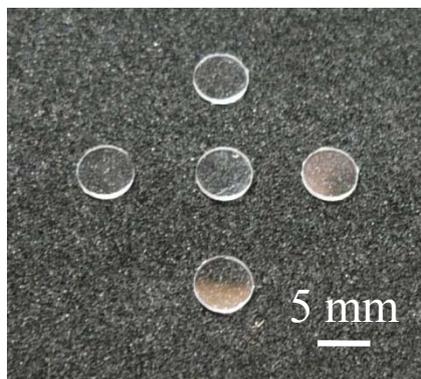


図 4-5 テンパックスガラスの円形カット

4.2.2 ガラスの熱応力割断結果

第 1 章で示すように大口径ガラスの割断には熱応力割断が用いられている。従来、熱応力割断はクラックの伝搬方向の制御が難しいため、MEMS のような小型素子に対しては適用されていなかった。そこで、レーザー内部加工を併用することで小さなチップに切り出せるか試した。図 4-6 に CO₂ レーザー照射実験系を示す。連続発振の CO₂ レーザーを反射型対物レンズか ZnSe レンズで集光し、ガラスに照射した。基板の固定には真空ポーラスチャックを用いており、マイクロスコープでアライメントを行った。通常、熱応力割断するには初期亀裂を形成する必要がある。従来はブレードなどで端の一部に傷をつけるが、本研究では Ti:Sapphire レーザーでダイシング方向に向かって 2mm 内部加工を形成し初期亀裂とした。図 4-7 のように間隔をあけて 2 つの初期亀裂を形成したサンプルを作成し、CO₂ レーザーをファーストライン、セカンドラインの順に 1 パス走査させてソーダライムガラス(厚み：1mm)を割断した結果を図 4-8 に示す。図 4-8(a)は初期亀裂の横の間隔が 10mm、図 4-8(b)は間隔が 2mm の場合である。レンズは反射型対物レンズを用いており、照射エネルギーは 4.7W、レーザー走査速度 3mm/sec、ビームの形状はリング状で外径 2mm、内径 0.5mm である。10mm 間隔の場合には、初期亀裂が進展し真っ直ぐに切断できているが、2mm 間隔の場合には、セカンドラインがそれて割断されている。これは、ファーストラインを割断後、セカンドラインの左側の幅が 2mm と狭くなったために熱応力が非対称にかかり亀裂が直進しなかったと考えられる。

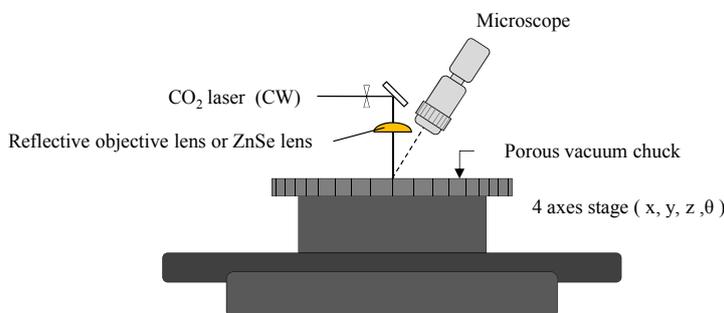


図 4-6 CO₂ レーザー照射実験系

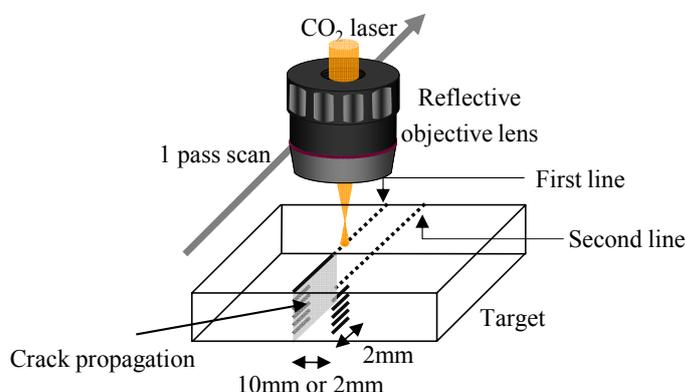


図 4-7 熱応力割断実験方法

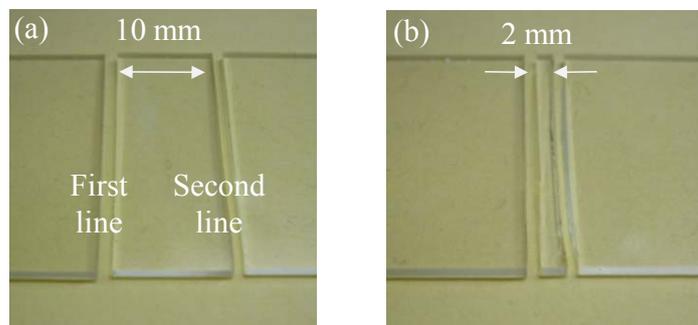


図 4-8 ソーダライムガラスの熱応力割断(加工品質のライン幅による影響)

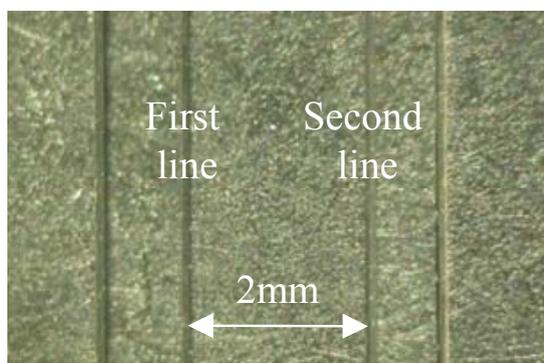


図 4-9 レーザー内部加工+熱応力割断の結果

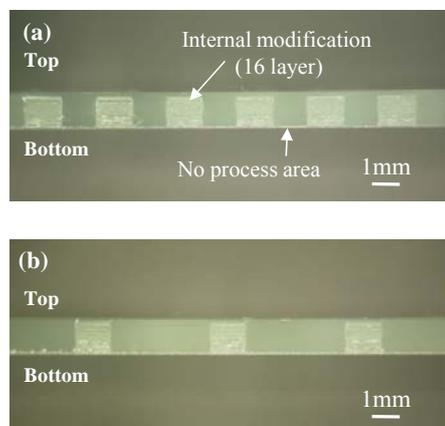


図 4-10 ミシン目状に内部加工したソーダライムガラスの熱応力割断面

そこで、Ti:Sapphire レーザーによる内部加工をダイシングライン全体に形成し、CO₂ レーザーを照射した結果を図 4-9 に示す。内部加工を形成することで、熱応力によって発生した亀裂が内部クラックに沿って伝搬するため、間隔が 2mm であっても図 4-9 のようにそれずに平行なダイシングラインが得られた。しかし、全面に内部クラックを形成すると時間がかかってしまう。そこで、スループット向上のためミシン目状の内部クラックについて検討を行った。図 4-10 はミシン目状に内部クラックを形成し、その後、熱応力で割断を行ったソーダライムガラスの割断面の顕微鏡写真である。それぞれのデューティー比は図 4-9(a) は 0.5, (b) は 0.25 である。白い部分に内部クラックが形成されていることから、熱応力によってのびた亀裂がダイシングラインに沿って真っ直ぐに進んだことがわかる。また、全体に内部加工を形成しなくても、シリンドリカルレンズを用いてビームをライン状 (14mm × 0.5mm) にすることで図 4-11 に示すように 4mm 間隔に割断できる。これは、スポット幅が狭くなることで熱応力のかかる領域が狭くなるためと考えられる。以上の結果を踏まえて、テンパックスガラスウエハ(厚み: 1mm)の熱応力割断を行った。時間短縮を考えてガラスに

Ti:Sapphire レーザーでクロス状の内部加工を形成した後に熱応力を加えて割断を行った. 図 4-12 に示すようにテンパックスガラスを小さな 3mm 角のチップに分割することに成功した. 断面に内部加工ラインが確認できるためダイシングラインに沿って割断されたことがわかる.

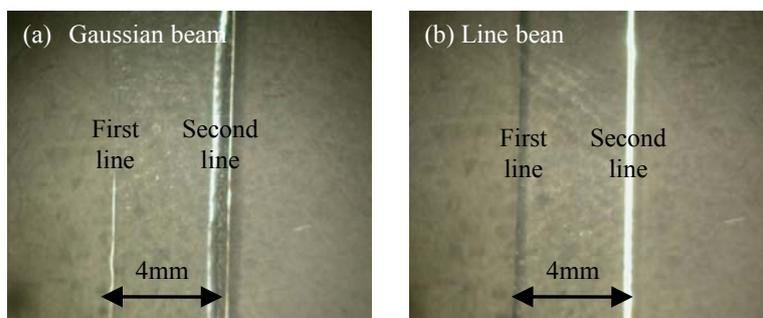


図 4-11 照射レーザースポットによる直進性の向上

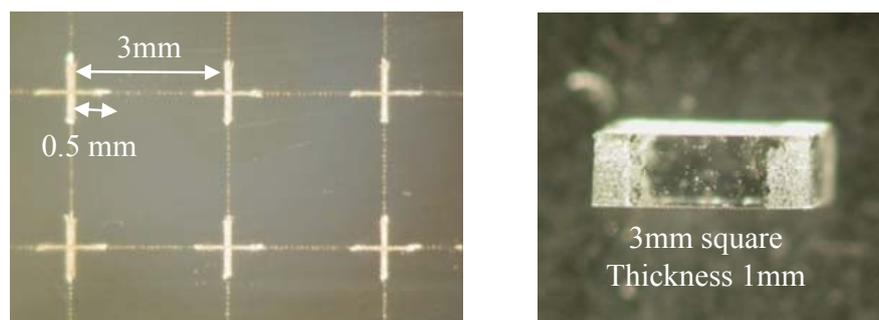


図 4-12 クロス状に内部加工を施したテンパックスガラスの熱応力割断結果

4.3 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力

Si ウエハ (厚み: 300 μ m) に対して, Nd:YVO₄ レーザー (パルス幅: 10ns) を NA0.8 の対物レンズで集光し内部加工ラインを形成する. Si の場合においても, 低ストレス割断するために表面にのびてくる亀裂の観察を行ったが, ガラスの場合に確認された表面亀裂は本実験では確認されなかった.

Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザー走査速度依存性を図 4-13 に示す. ウエハ加工条件は, エネルギー 20 μ J, 繰り返し周波数 100kHz, レーザー走査速度 10~700mm/ssec であり, ウエハの厚さ方向全体に内部加工がつながるようにレンズのデフォーカス量を 10 μ m ずつ変化させ 5 層レーザー加工した. 評価試料サイズは, Si(厚み: 300 μ m)の 6 \times 20mm であり, 各条件ごとに 5 サンプル測定した. 図 4-13 の写真より走査速度が速くなるにつれて内部クラックからそれて割断されていることが確認できる.

図 4-14 に Si ウエハをレーザー走査速度(a)100mm/sec, (b)300mm/sec で内部加工して割断した時の断面図を示す. 走査速度を上げると内部クラックが重ならなくなると同時に深さ

方向のサイズが減少し、未加工部ができる。上部から観察した時の Si の内部クラック幅は $5\mu\text{m}$ 程度と小さいため、外部ストレスを加えた場合、深さ方向に未加工部があることによってそれで割断される可能性が高くなる。その結果、余分な力が必要になり大きな曲げ応力になったと考えられる。逆に走査速度 10mm/sec と遅い場合に曲げ応力が大きくなったのは、レーザーが同一箇所に重なって当り過ぎたことで溶けが発生し、引っ付いた可能性が考えられる。

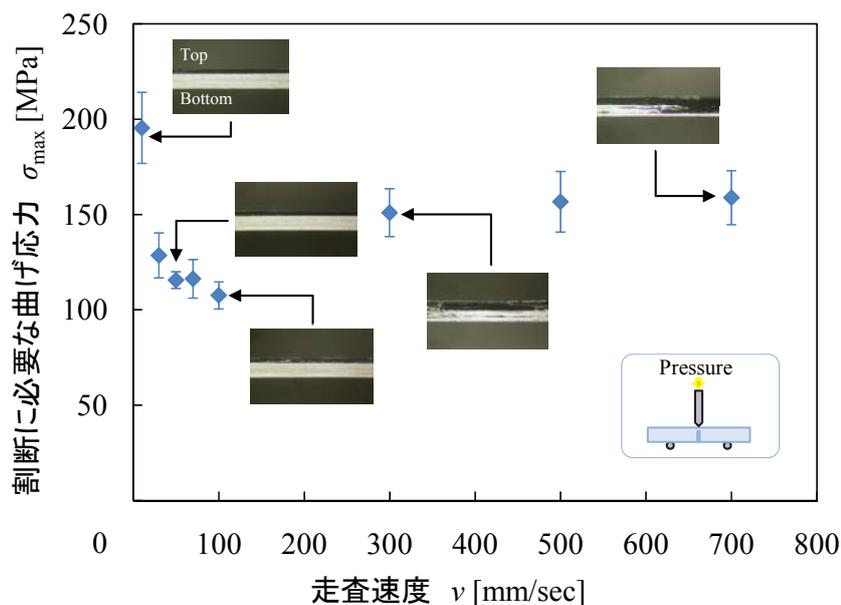


図 4-13 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザー走査速度依存性

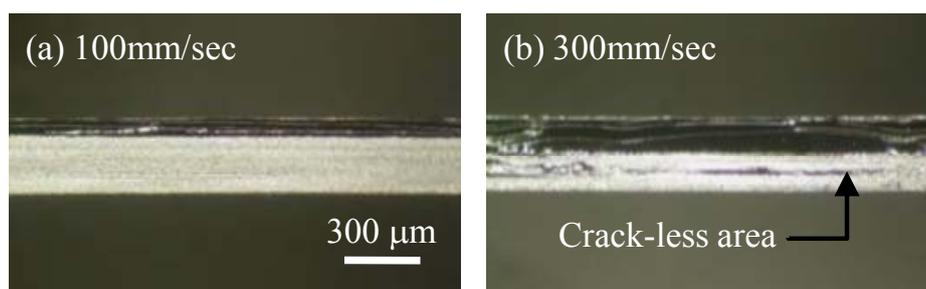


図 4-14 内部加工を施した Si ウエハの割断面観察

深さ方向のクラックが繋がっており、一番曲げ応力が小さい走査速度 100mm/sec の場合でも、 110MPa とテンパックスガラスに比べて非常に大きな力が必要であった。次に、ガラスの場合と同様に、走査速度を 100mm/sec で最上層と最下層のレーザー加工位置を固定して、その間の層数を $0\sim 41$ 層と変化させて曲げ応力を測定した結果を図 4-15 に示す。内部加工ラインの層数が 5 層以上の場合は、曲げ応力が 100MPa 程度と飽和した。また、深さ

方向にクラックが繋がっていない 3 層の場合は大きな曲げ応力が必要となった。エネルギー $20\mu\text{J}$ で加工を行った場合は、表面アブレーションを避けるためデフォーカス量を多くしており、表面から $50\mu\text{m}$ が未加工になっていた。そこで、エネルギーを低くして表面近くに内部加工を形成することで曲げ応力低下を狙った。エネルギーを $5\mu\text{J}$ に変更した結果、未加工部が $20\mu\text{m}$ となり、曲げ応力を 73MPa まで低下できた。以上のことから、Si に対しては深さ方向にクラックがつながるように層数と速度を設定する必要がある。Si に形成される内部クラック深さは $70\mu\text{m}$ であるため、重なりを少し考慮して $60\mu\text{m}$ ごとに 1 ライン加工を行うことで、ダイシングラインに沿った割断ができる。走査速度は繰り返し周波数が 100kHz の場合、 100mm/sec が適当である。また、低エネルギーでなるべく未加工部を残さない加工を行うことが重要である。

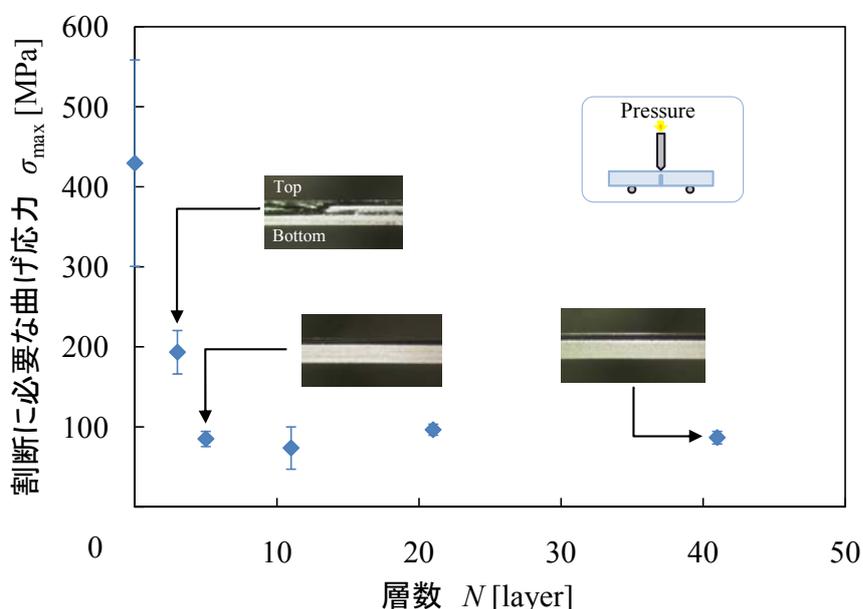


図 4-15 Si の割断に必要な曲げ応力の内部加工層数依存性

4.4 接合ウエハの割断に必要な曲げ応力

4.2.1 節, 4.3 節の結果を踏まえて, テンパックスガラス/Si 接合ウエハの割断に必要な曲げ応力を測定した。積層ウエハをレーザー加工する場合, エネルギー損失を考慮してガラス側からレーザーを照射し Si, テンパックスガラスの順に加工した。レーザー照射条件は, 前述した実験結果より Si に対しては加工層数 6, エネルギー $5\mu\text{J}$, 繰り返し周波数 100kHz , 走査速度 100mm/sec , テンパックスガラスに対しては加工層数 5, エネルギー $125\mu\text{J}$, 繰り返し周波数 20kHz , 走査速度 500mm/sec とした。実験の結果, 接合ウエハの割断に必要な曲げ応力は約 14MPa であった。式(1-1)からもわかるように曲げ応力は厚みの 2 乗がかかるため, 接合ウエハは厚みがある分, 曲げ応力が小さく表れる。これを押し力 $F[\text{N}]$ で評価すると 1.9N であり, Si の割断に必要な押し力と同じであることが確認できた。次に, このダ

イシング技術が実デバイスに対しても有効であるか確認するため、図 4-16 に示す圧力センサの切断を行った。この圧力センサはダイヤフラムやギャップ間に破損や張り付きが起きないように、また、ITO 電極の隙間に水やゴミが浸入しないようにダイシングする必要がある。

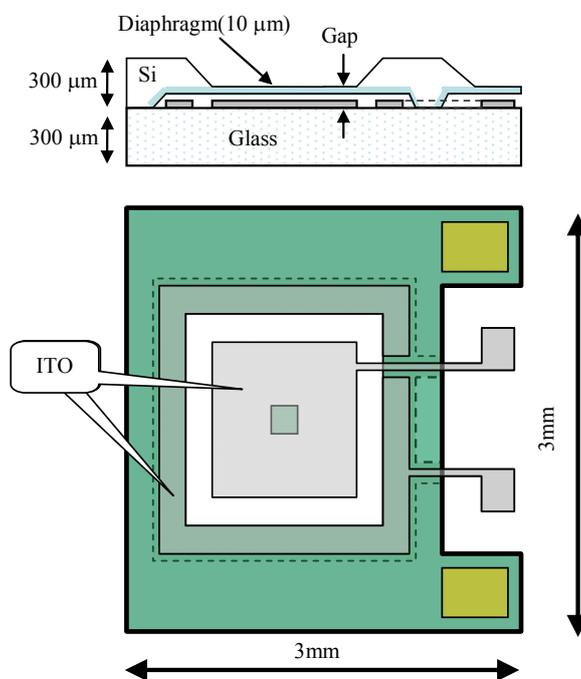


図 4-16 静電容量式圧力センサの構造

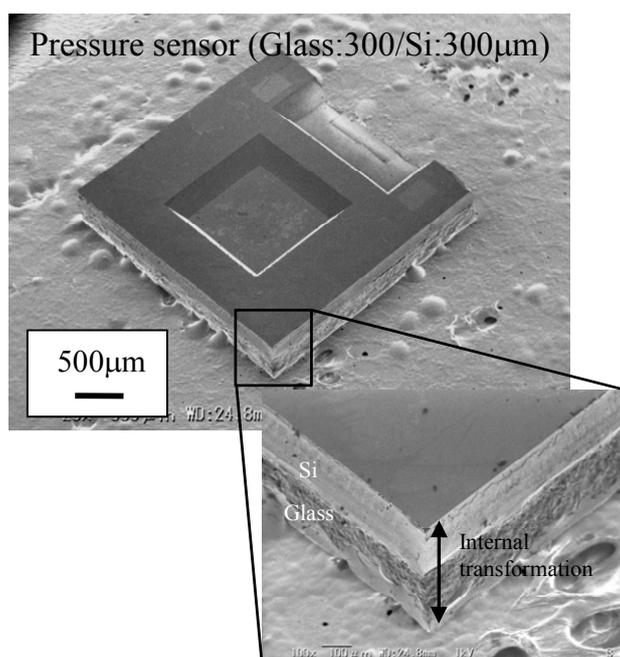


図 4-17 圧力センサの低ストレスレーザーダイシング結果

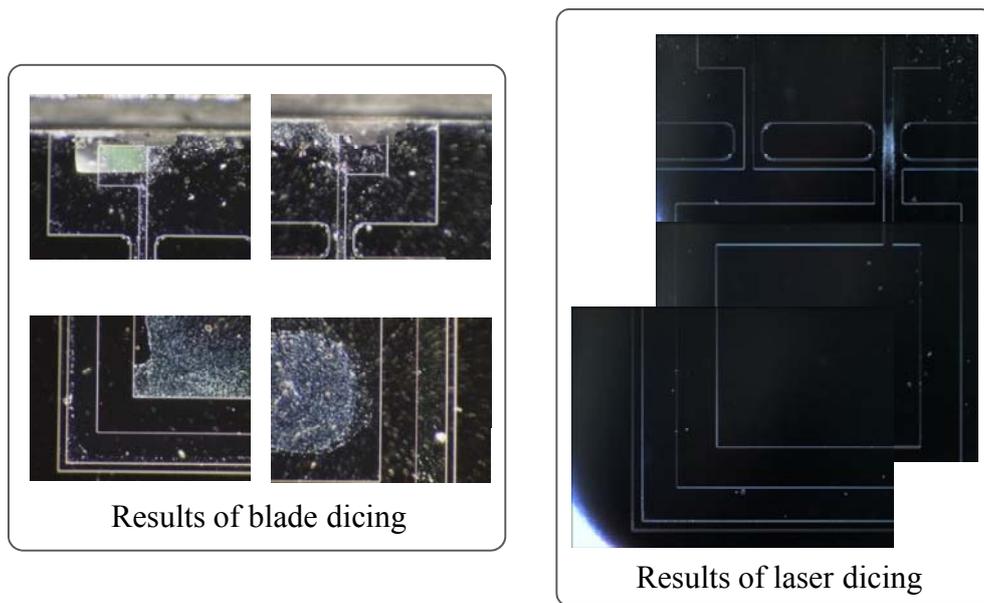


図 4-18 ダイシング法による加工品質の比較

る．図 4-17 に上記の条件で実デバイスを切断し SEM で観察した様子を示す．ダイヤモンド内にデブリの侵入はなく，内部クラックラインに沿ってきれいに切断することができている．図 4-18 は低ストレスレーザーダイシング，ブレードダイシングで圧力センサを切断した後に，それぞれのデバイスを暗視野観察した結果である．ブレードダイシングの場合には，水が侵入し多くのデブリが付着して全てのデバイスが破損したのに対して，レーザーダイシングの場合にはダイヤモンド内に水・デブリの侵入はなく高品質に切断できたといえる．以上の結果より，この低ストレスレーザーダイシング技術が有効であることが示された．

4.5 まとめ

テンパックスガラス, Si ウェハ, テンパックスガラス/Si 接合ウェハに対して, 波長 1064nm, パルス幅 10ns の Nd:YVO₄ レーザーで低ストレスレーザーダイシングを行った．

Nd:YVO₄ レーザーを用いると, テンパックスガラスに表面亀裂を形成でき, それを利用することで 10MPa 程度と低ストレス切断が可能となった．ガラスの切断において層数は, 厚さ 150 μ m ごとに 1 層程度で十分低ストレスに切断ができる．また, ガラスの熱応力切断に内部加工を併用すると, ダイシングラインからのそれがなくなり, 従来困難であった小さなチップの切り出しに成功した．

Si の場合, 本実験では表面亀裂が確認できず, ウェハの切断に必要な曲げ応力は 74MPa とテンパックスガラスに比べて大きな力が必要であることがわかった．Si の切断においては, 深さ方向にクラックがつながるように最低 60 μ m ごとに 1 層加工し, 速度も最適値選ぶ必要がある．また, 低エネルギー照射し表面近くの未加工部分を残さない加工を行うこと

が重要である。

接合ウエハに対して、1 台の Nd:YVO₄ レーザーを使用して低ストレスレーザーダイシングを行った結果、チップに分割することに成功した。接合ウエハの割断においては、Si 層の割断に必要な押し力が支配的であることが明らかとなった。また、実デバイスである圧力センサの割断を行った結果、破損することなく高品質に割断することができ、ダイシングブレードによる割断と比較して本手法が有効であることが示された。

第5章 低ストレスダイシングに向けて各種ウエハ加工条件の検討

5.1 はじめに

第4章に示すように、パルス幅 10ns の Nd:YVO₄ レーザーを用いることで実デバイスをデブリフリーに切断できたが、MEMS ウエハはできる限り弱い力で切断することが望まれる。そこでテンパックスガラス、Si ウエハそれぞれに対してレーザー波長やパルス幅を最適化し、その条件で接合ウエハのダイシングを行った。また、接合ウエハダイシング方法の再検討も行った。

5.2 テンパックスガラスの切断に必要な曲げ応力のレーザー波長依存性

テンパックスガラスは低ストレス切断を実証しているため、Nd:YVO₄ レーザーの第2高調波（波長：532nm）を用いてダイシング幅の減少を試みた。

テンパックスガラス（厚み：500 μ m）に対して Nd:YVO₄ レーザーの基本波と第2高調波をシングルパルス照射して内部クラックを形成した。図5-1にガラスの加工閾値近傍のエネルギーを照射した時に形成される内部クラック形状を示す。照射エネルギーは基本波 80 μ J、第2高調波 38 μ J であり、レンズはそれぞれに波長透過率が高い NA0.8 の対物レンズを用意し用いた。内部クラックの形状はどちらも集光点から等方的にクラックが伸びており似ているが、第2高調波の場合は大きさが半分になっていることがわかる。表5-1はNd:YVO₄ レーザーの基本波、第2高調波による加工を比較したものである。テンパックスガラスに対して加工閾値近傍のエネルギー（基本波：80 μ J、第2高調波：38 μ J）をシングルパルス照射した時の内部クラックサイズと、加工条件が加工層数5、加工閾値の1.5倍エネルギー（基本波：125 μ J、第2高調波：57 μ J）、繰り返し周波数20kHz、走査速度100mm/secでレーザー加工した時の加工線幅と切断に必要な曲げ応力を示している。第2高調波を用いることで、加工線幅を基本波の半分以下である約43 μ mにできる。また、曲げ応力に関しては少し増加したが、17MPaであれば弱い力で問題なく切断できるため、ダイシング幅を抑えたいデバイスの切断に有効であるといえる。

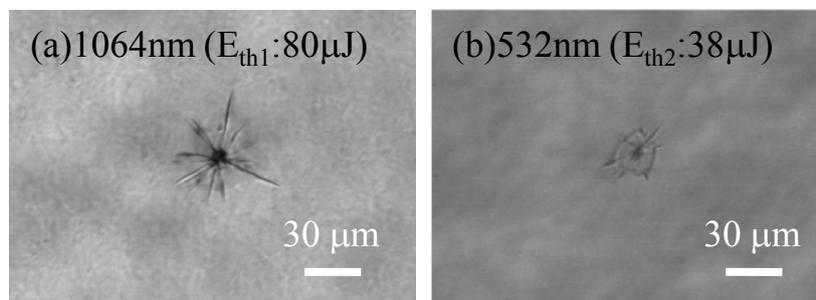


図5-1 テンパックスガラスの内部クラック形状比較

表 5-1 Nd:YVO₄ レーザーの基本波，第 2 高調波による
テンパックスガラス内部加工比較

	Nd:YVO ₄ (λ:1064nm)	Nd:YVO ₄ (λ:532nm)
シングルパルス照射によるクラックサイズ	60μm	30μm
加工線幅(閾値の1.5倍のエネルギーで加工)	95μm	43μm
分離に必要な曲げ応力	10MPa	17MPa

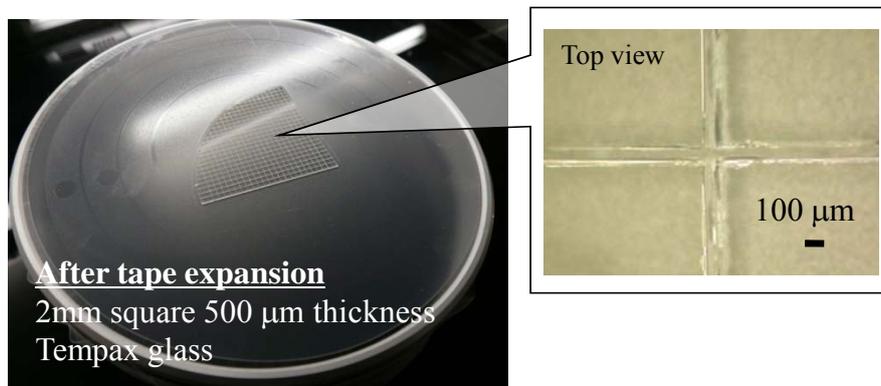


図 5-2 Nd:YVO₄ レーザー (λ : 532nm) による
テンパックスガラスの 2mm 角ダイシング

図 5-2 に Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いて，テンパックスガラス（厚み：500μm）を 2mm 角にチップ化した結果を示す．チップ分割手順は，レーザー加工したガラスウエハに対してブレード方式のブレイク装置を用いてチップに分割し，テープエキスパンドを行った．ダイシング幅を抑えたまま全てチップに分割することに成功した．

5.3 Si ウエハの割断に必要な曲げ応力のレーザーパルス幅依存性

接合ウエハの割断において，Si の低ストレス割断が重要であることがわかった．そこで，Si に対して，ウエハ表面まで伸びてくる亀裂を発生できれば低ストレス割断ができると考えられるため，表面亀裂のパルス幅依存性について調べた．

Si（厚み：300μm）にパルス幅の異なる Nd:YVO₄ レーザーを NA0.8 の対物レンズで集光し，内部加工を行った．図 5-3 にエネルギー 5μJ，パルス幅(a)10ns，(b)50ns，(c)100ns，レンズのデフォーカス量 10μm で 1 ライン加工を行った Si 表面の様子を示す．10ns の場合には表面亀裂が，パルス幅が長くなるにつれて安定して発生した．特に，100ns の場合にはウエハ全体に安定して亀裂を発生でき，レンズのデフォーカス量 5μm の範囲において表面亀裂の発生が確認された．

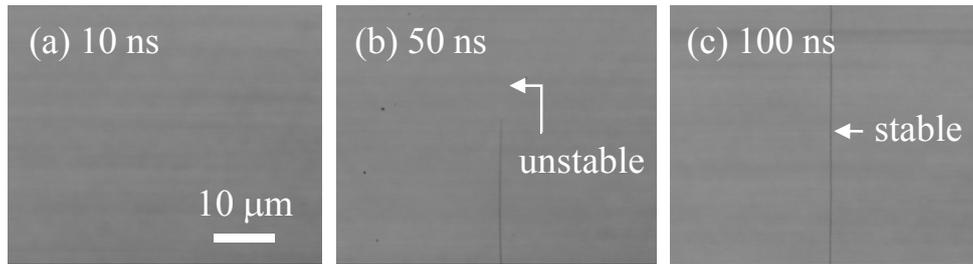


図 5-3 Si 表面に発生する亀裂の観察

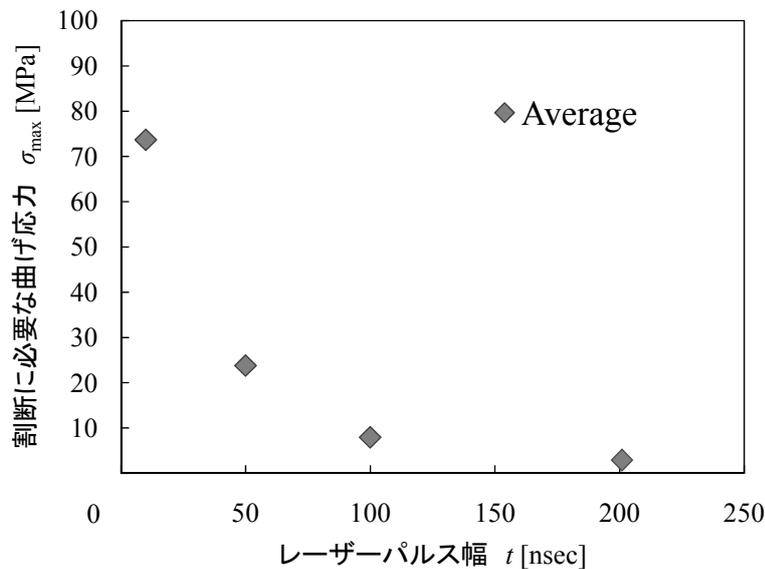


図 5-4 Si の割断に必要な曲げ応力のレーザーパルス幅依存性

次に、Si の割断に必要な曲げ応力のパルス幅依存性を図 5-4 に示す。加工条件は深さ方向全面に密に内部加工されるように層数を増やし、加工層数 13、エネルギー 5 μ J、繰り返し周波数 100kHz、走査速度 100mm/sec とした。パルス幅の長さに伴い曲げ応力が減少していることが確認できる。100ns の場合には、非常に割断されやすくサンプルの大半が測定できない程であった。そのため、図 5-4 には測定できたサンプルの平均値を示しており、実際はテンパックスガラスよりはるかに低ストレスで割断できるようになった。また、パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザー（波長：1064nm）で加工を行うと、更に表面亀裂が安定的に形成できることが明らかになった。この時の曲げ応力は現状の装置では測定できない程に弱いため、Si の内部加工には熱影響が大きいロングパルスレーザーが適しているといえる。図 5-5 にパルス幅 10ns と 200ns レーザーで 1 ライン内部加工した時の断面を示す。パルス幅が長くなると内部クラックの幅が少し大きくなり、更に上下端にクラックが進展していることが確認できる。これは、パルス幅が長いと熱拡散長が長くなりウエハ表面までクラックが進展するため、ウエハ全面に安定的に表面亀裂が形成されたと考えられる。熱

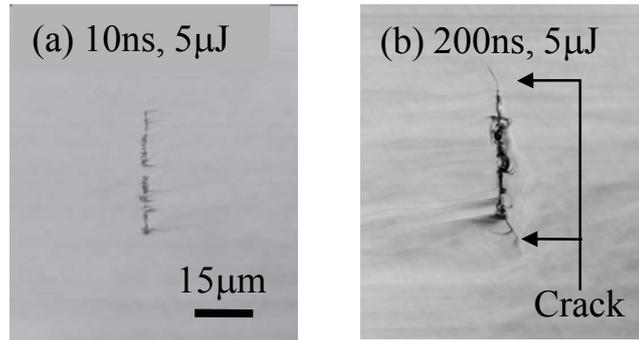


図 5-5 Si に形成される内部加工ラインの断面比較

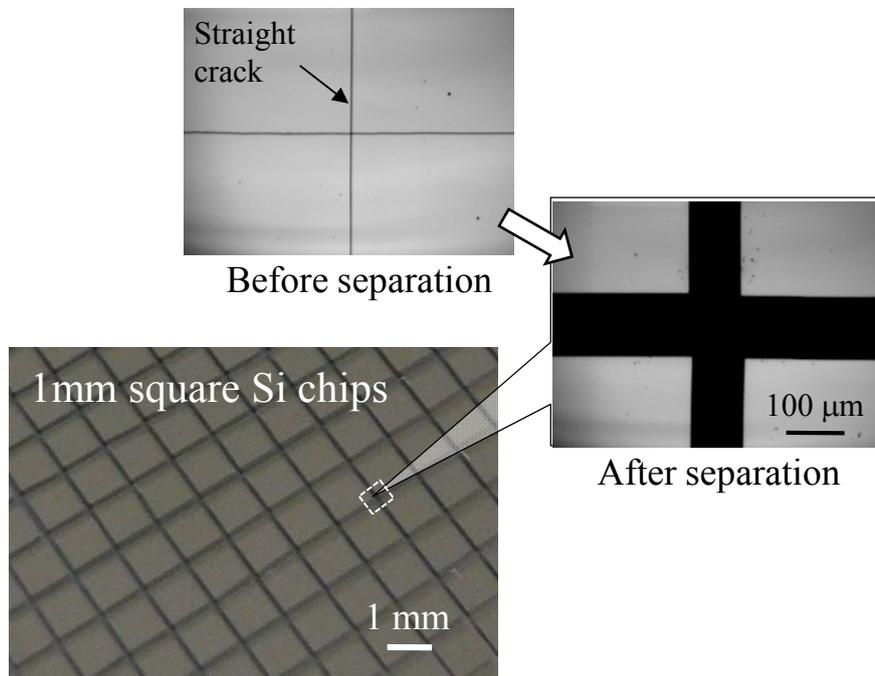


図 5-6 Yb ファイバーレーザーによる Si ウエハの 1 mm 角ダイシング

拡散長 l は、材料の熱拡散係数 D 、レーザーパルス幅 τ として次式で表される。

$$l = 2(D \cdot \tau)^{\frac{1}{2}} \quad (5-1)$$

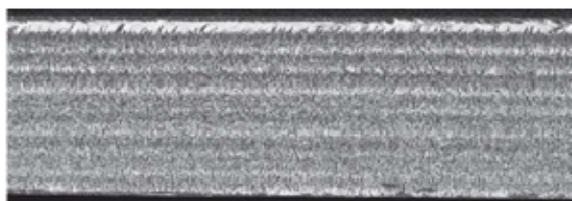
ロングパルスレーザーの熱影響については、断面に溶けがなく、EBSD 法で結晶方位を確認しても多結晶化していなかったため問題ないと考えられる。しかし、横方向に内部加工が広がりマイクロクラックが発生したため、部分的には脆くなっている可能性がある。今後、このマイクロクラックがどの程度デバイスに対して悪影響を及ぼすのか検討する必要がある。図 5-6 に Yb ファイバーレーザー(パルス幅 : 200ns)を用いて Si ウエハ (厚み : 300 μ m) を 1mm 角にチップ化した結果を示す。レーザー加工後の Si 表面の光学顕微鏡像より表面亀

裂が安定的に発生している様子がわかる。この Si ウエハに対して球面テープエキスパンド装置を用いてチップ化とエキスパンドを行った結果、全て 1mm 角にチップ化でき、デブリフリー低ストレスダイシングを実現した。

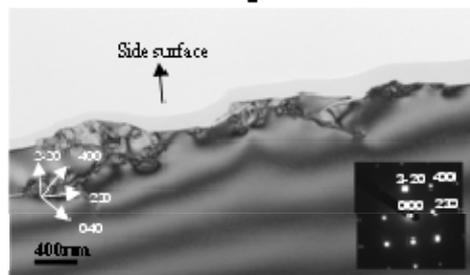
5.4 加工断面の構造解析

Si 切断を行った試料の切断面に対して、EBSD 解析と HRTEM 観察を行った。図 5-9 にパルス幅 50 ns の時の観察結果を示す。(a)の EBSD 観察から、切断面の結晶構造は、元の(100)ウエハと同じ方位を向いており、多結晶化も発生していないことが明らかになった。これは図 3-20 で示したパルス幅 200 ps の Er ファイバーレーザーによって加工したものに対する結果と変わらなかった。奥行き方向のウエハのダメージを観察するために行った HRTEM 観察 (b)からは、奥行き方向に最大で長さ 1 μm 程度の転位の発生を確認できたが、周囲での結晶性の変化は見られなかった。このことから、本技術による Si の切断面はレーザーアブレーションに比べて熱的ダメージが極めて少ないことが明らかになった。

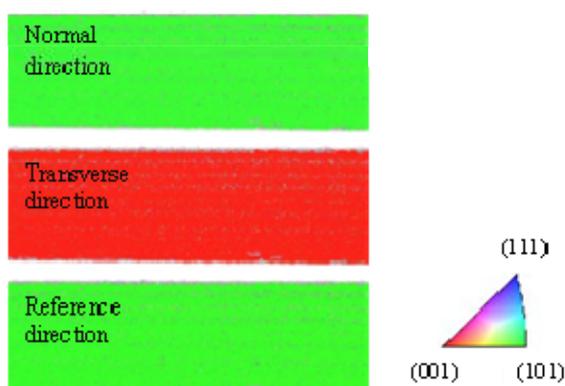
(a-1) Image quality MAP



(b-1) HRTEM image $\times 50,000$



(a-2) Inverse Pole Figure MAP



(b-2) HRTEM image $\times 2,000,000$

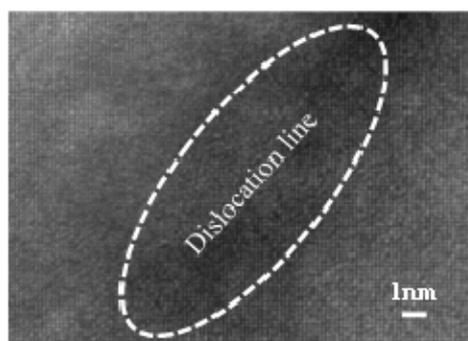


図 5-9 パルス幅 50 ns の Nd:YVO₄ レーザーによる Si 内部加工断面への (a)EBSD 測定および(b)HRTEM 測定

5.5 二台のレーザーによる接合ウエハのダイシング結果

5.2 節, 5.3 節の結果から, 接合ウエハ (厚さ: 300-300 μm) のテンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波, Si に対してパルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーで加工した結果を図 5-10, 図 5-11 に示す. レーザー照射条件は, Si に対しては加工層数 13, エネルギー 5 μJ , 繰り返し周波数 100kHz, 走査速度 100mm/sec, テンパックスガラスに対しては加工層数 5, エネルギー 57 μJ , 繰り返し周波数 20kHz, 走査速度 500mm/sec である. また, Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波の時はガラス面を上にして照射, Yb ファイバーレーザーの時は Si 面を上にして照射した. このような加工を行った接合ウエハの曲げ応力を測定した結果は 9MPa (押し力: 1.3N) であり, 10ns レーザーで加工した場合の 14MPa (押し力: 1.9N) と比較して, 低ストレスでチップ化できることが示された.

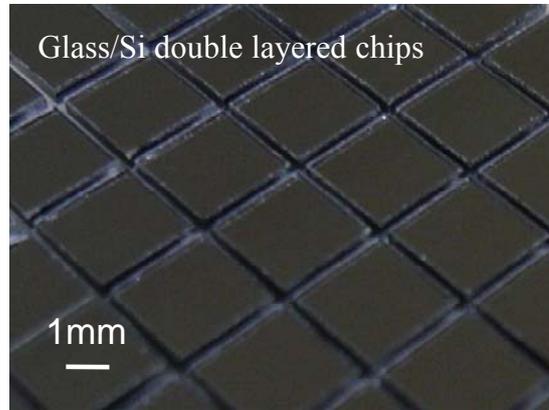


図 5-10 2 種類のレーザーを用いた接合ウエハの 3mm 角ダイシング

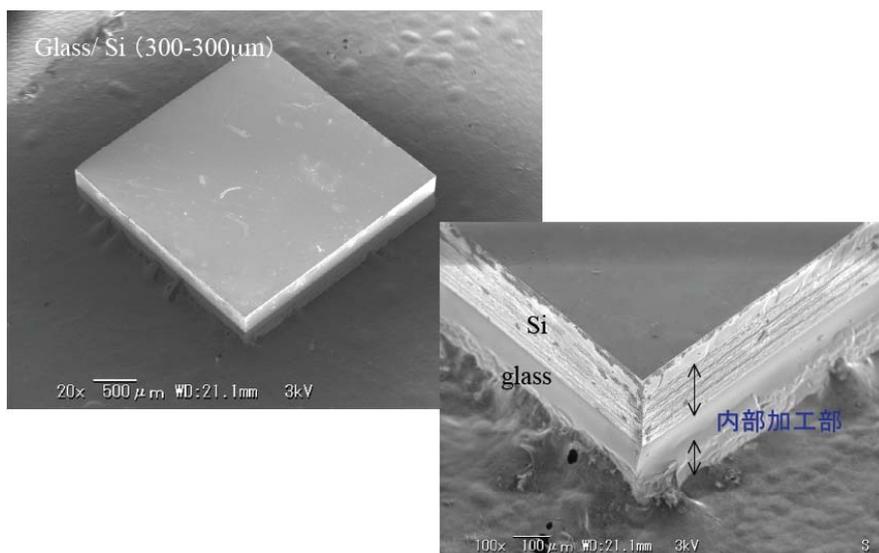


図 5-11 図 5-10 でダイシングされたチップの SEM 像.

5.6 接合ウエハの新たなダイシング方法

図 4-17, 図 5-10, 11 に示す 2 層構造試料の低ストレスレーザーダイシング結果は, ガラスに内部加工を行ったため, ガラス断面にその内部クラックの形状が残ってしまう. 低ストレスレーザーダイシングしたデバイスに対して衝撃試験, 振動試験をした結果, デバイスの品質上問題ないレベルではあったが, 断面から小さなガラス片が取れる可能性がある. そこで, ガラスに内部加工を行わずに接合ウエハをダイシングする手法を考えた.

初めに, 接合ウエハ (厚み: 300-300 μm) の Si のみに加工を行いチップに分割できるか試した. パルス幅 10ns, 50ns, 100ns の Nd:YVO₄ レーザー, パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーを用いて, 接合ウエハの Si 側からレーザー照射して Si のみに内部加工を行った後, ガラス側からブレードを押し当てた時の割断に必要な曲げ応力測定結果を図 5-12 に示す. 接合ウエハの Si 加工条件は加工層数 13, エネルギー 5 μJ , 繰り返し周波数 100kHz, 走査速度 100mm/sec である. 図 5-4 と同様にレーザーのパルス幅が長い程, 割断に必要な曲げ応力が減少している. また, パルス幅 100ns 以上の場合には, 曲げ応力の値が飽和することが確認できた. パルス幅 200ns で加工を行った接合ウエハの割断に必要な曲げ応力は約 14MPa (押し力: 1.9N) であった. 2 種類のレーザーを用いた場合の 9MPa (押し力: 1.3N) と比べると曲げ応力が増加したが, 10ns の Nd:YVO₄ レーザーでガラス, Si とともに加工した場合とほぼ同じ曲げ応力であることがわかった. パルス幅 200ns のレーザーで評価用ウエハ (圧力センサ) の Si のみを加工して割断した結果を図 5-13 に示す. レーザー加工した接合ウエハの分割方法としては, Si の表面亀裂から割くように分割するため, ガラス面にブレ

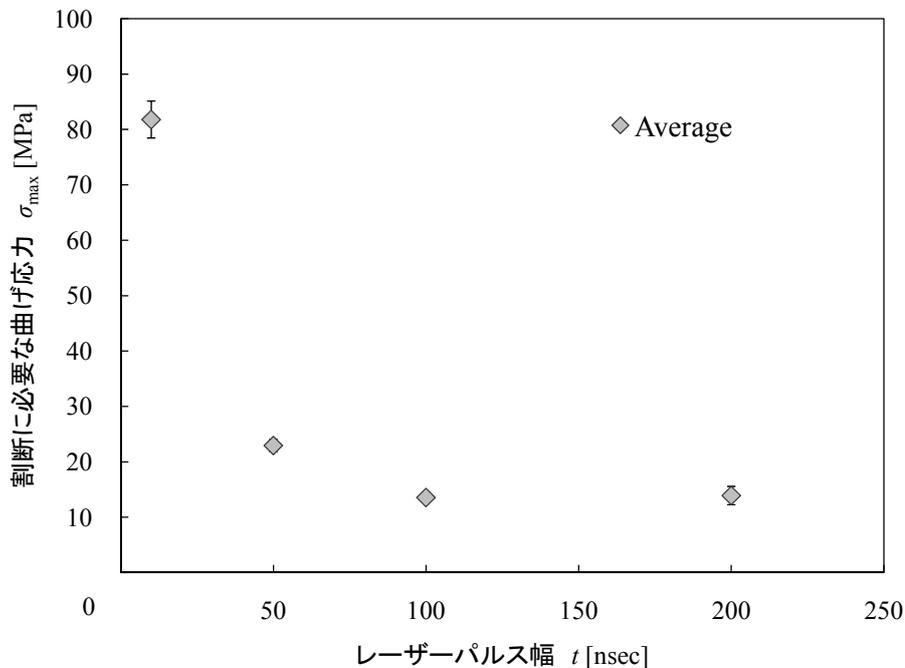


図 5-12 Si のみ加工した接合ウエハの割断に必要な曲げ応力 (レーザーパルス幅依存性)

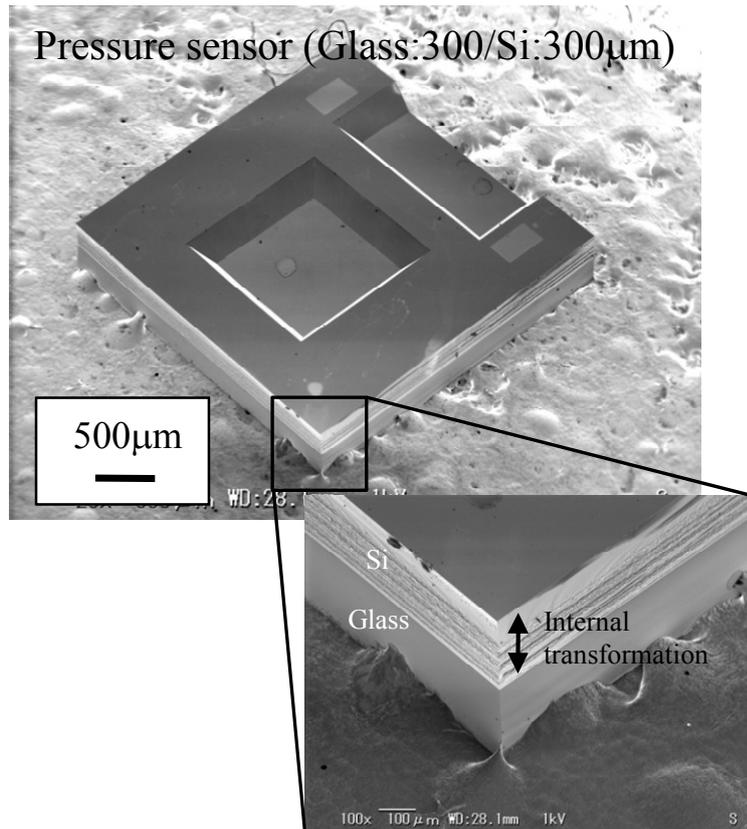


図 5-13 圧力センサのレーザーダイシング結果 (Si のみ加工した場合)

ードを押し当ててチップ化した。このダイシング方法の利点は、図 5-13 からわかるように、ガラスを一切加工していないため、傷がなく高品質な断面が得られる点である。Si が内部加工された時にガラスにも応力が局所的に集中することで、きれいに切断できたと考えられる。

また、この Si のみを加工した接合ウエハに対してブレードではなく、熱応力を加えることでチップ化できるかも試した。パルス幅 50ns, 100ns の Nd:YVO₄ レーザー、パルス幅 200ns の Yb ファイバーレーザーを用いて、接合ウエハの Si 側からレーザー照射して Si のみに内部加工を行った後、CO₂ レーザーを Si 側から照射して熱応力を加えた。Si 加工条件は図 5-12 と同様で、加工層数 13、エネルギー 5 μ J、繰り返し周波数 100kHz、走査速度 100mm/sec である。CO₂ レーザー照射条件は Si ウエハが溶けないように、かつガラスに亀裂が入るように設定し、エネルギー 54.6W、走査速度 90mm/sec、バーンパターンは 1mm で 1 ライン走査した。この接合ウエハの切断に必要な曲げ応力測定結果を図 5-14 に示す。熱応力を加えた場合は、レーザーのパルス幅の影響を受けずにほぼ一定の曲げ応力で切断されることが確認できる。熱応力を加えた接合ウエハの切断に必要な曲げ応力は、約 4.6MPa (押し力 0.65N) であり極めて低ストレスに接合ウエハの切断ができた。この実験では曲げ応力評価用サン

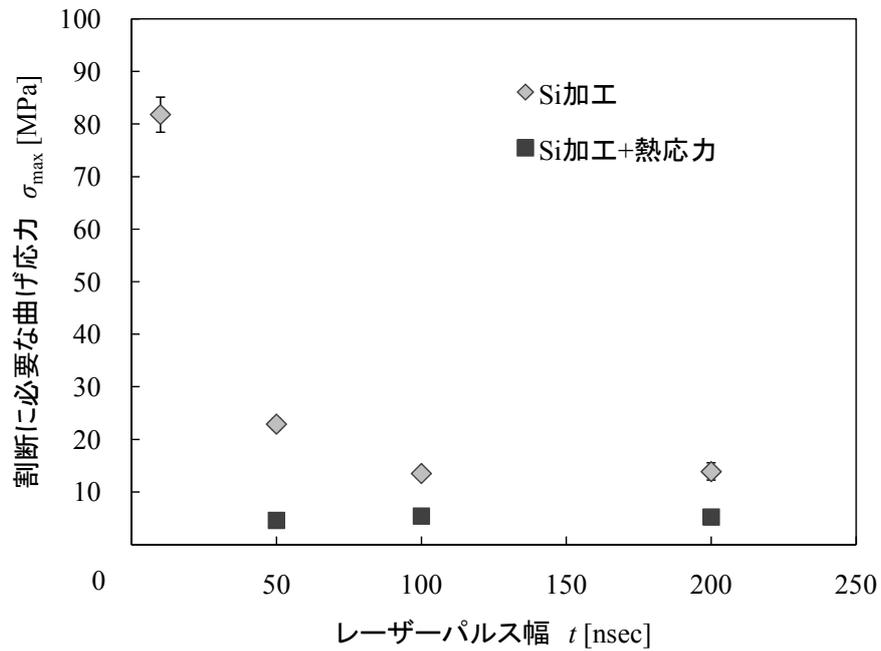


図 5-14 Si 内部加工と熱応力を加えた接合ウエハの割断に必要な曲げ応力 (レーザーパルス幅依存性)

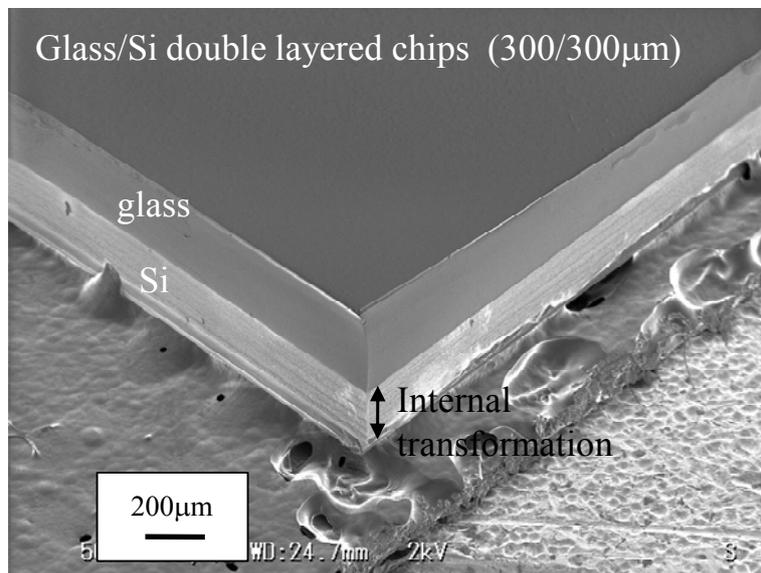


図 5-15 接合ウエハのレーザーダイシング結果(Si 加工+熱応力割断の場合)

プルを複数用意したが、一部のサンプルは測定前に分離されるほどであった。図 5-15 にパルス幅 50ns のレーザーで Si 内部加工をした接合ウエハの熱応力割断結果を示す。ガラスの部分が熱影響によって少し溶けたように見えるが、CO₂ レーザーの照射条件を最適化するこ

とで解決できると考えられる。この手法を用いることで、ガラス面のクラック傷もなく低ストレスに切断できることが明らかとなった。

5.7 まとめ

ダイシングの低ストレス化、品質向上のために、ガラス、Si それぞれに対してレーザー波長、パルス幅の最適化を行い、その条件を用いることで接合ウエハの低ストレス切断に成功した。また、新たな加工方法を用いることで接合ウエハのガラス断面に傷がなく高品質にチップ化できることを示した。

テンパックスガラスに対して、Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いることで加工線幅を 43 μ m まで抑えることができ、チップの取り数が増えるメリットがうまれる。また、Si に対しては、パルス幅が数 100ns のレーザーを用いることで表面亀裂の形成が可能となり、テンパックスガラス以上に低ストレスで切断できることを示した。

接合ウエハにおいては、テンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波、Si に対してパルス幅数 100ns のパルスレーザーを使用することで低ストレスダイシングを実証した。また、接合ウエハのガラス面に傷がない高品質なチップを望む場合は、Si のみを加工することで達成できる。Si のみ加工したウエハに対して CO₂ レーザーで熱応力を加えると、切断に必要な曲げ応力が 4.6MPa と大幅に減少し、高品質にデブリフリー低ストレスダイシングが行えることを示した。

第6章 結論

従来のダイシング技術では切断が困難であった積層 MEMS を、レーザーによってデブリフリーに低ストレス切断する技術の開発を行った。

初めに、MEMS の一般的な構成要素であるテンパックスガラス、Si に対してレーザー内部加工を行い、形成される内部クラックの形状を調べた。テンパックスガラスに対しては、フェムト秒レーザーを用いることで、ダイシング幅を $10\mu\text{m}$ 以下にでき、チップの取り数を多くできることを示した。ナノ秒レーザーを用いた場合は $80\mu\text{m}$ 程度と内部クラックは大きい。高速にチップ化できる利点がある。いずれの場合においても、内部クラックのアスペクト比は 1.5 程度であった。Si に対しては、透過性のある Nd:YVO₄ レーザーでダイシング幅 $5\mu\text{m}$ 以下の加工が出来ることを示した。また、Si に形成される内部クラックのアスペクト比は 15 以上とガラスに比べて大きいことがわかった。

次に、内部クラックをライン状につなげて、テンパックスガラス、Si ウエハ、テンパックスガラス/Si 接合ウエハのダイシングを行った。加工用レーザーにはガラス、Si の両方に対して透過性のある Nd:YVO₄ レーザーを用いた。ガラスの曲げ応力切断結果は、表面亀裂を利用することで曲げ応力 10MPa 程度とわかり、低ストレスに切断できることを示した。また、熱応力切断では内部加工を併用することで従来困難であった小さなチップの切り出しに成功した。一方、Si の切断に必要な曲げ応力は 74MPa とガラスに比べて大きいことがわかった。Si を低ストレス切断するには、照射エネルギーを低くして、表面近くに未加工部を残さないことが重要である。以上の結果を踏まえて、ガラス/Si 接合ウエハの切断を行った結果、 3mm 角にチップ化することに成功した。接合ウエハの切断においては、Si 層の切断に必要な曲げ応力が支配的であることが明らかとなった。この技術を用いて実デバイスである圧力センサを切断した結果、破損することなく高品質に切断することができた。ダイシングブレードによる切断と比較して本手法が有効であることが示された。

実デバイスの低ストレスレーザーダイシングに成功したが、脆弱構造を有する MEMS デバイスはできる限り低ストレスに切断する必要がある。そこで、ダイシングの低ストレス化、品質向上のために、ガラス、Si それぞれに対してレーザー波長、パルス幅の最適化を行い、その条件を用いることで接合ウエハの低ストレス切断を行った。テンパックスガラスに対しては、Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波を用いることで加工線幅を $43\mu\text{m}$ に抑えることができた。Si に対しては、パルス幅数 100ns のレーザーを用いることで表面亀裂を形成でき、ガラス以上に低ストレス切断できることを実証した。接合ウエハのテンパックスガラスに対して Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波、Si に対してパルス幅数 100ns のパルスレーザーを使用することで、パルス幅 10ns のレーザーを 1 台使用するよりも低ストレスにダイシングできることを示した。また、接合ウエハの Si のみを加工することで高品質なチップの切り出しが行えることを発見した。更に Si のみ加工したウエハに対して CO₂ レーザーで熱応力を加えると、切断に必要な曲げ応力が 4.6MPa と大幅に減少し、高品質、デブリフリー

ーに低ストレスダイニングできることを実証した.

2-4. 開発成果のまとめ

(1) 目標の達成度

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	多層 MEMS 構造の切断技術開発	多層構造 3 種類以上についてレーザーダイシング試験を行い、試料の破損率 1%以下を達成する。	多層構造 3 種類以上についてレーザーダイシング試験を行い、試料の破損率 1%以下を達成。	○
自主目標	MEMS 構成材料のレーザー加工・改質特性調査	Si とガラスにおいて 1-2 μ m の波長帯域で、Si において 10ns-200ns のパルス幅範囲でレーザー加工・改質特性を確認	広範囲な波長域、パルス幅領域でレーザー加工・改質特性を確認することにより、ガラス/Si 積層体に対して新たなダイシング手法を見いだした。	◎
自主目標	分割支援構造の評価・設計・製作・検討	破損率を定義・評価できる試料を製作	破損率評価に適宜サンプルを提供	○

(2) 成果の意義

産業用として普及している安価な YAG レーザー、CO₂ レーザーを用いて積層ウェハをデブリフリーでダイシングできる可能性を明らかにした。これにより、既存の高価でブラックボックス的なレーザーダイシング法にとらわれることなく、様々なダイシングニーズが存在する少量多品種の MEMS ウェハに対してデブリフリーレーザーダイシング手法の適用性が拡大する。

(3) 知的財産等の取得

国内特許出願 3 件

(4) 成果の普及

大阪大学と東北大学に“お試し”加工用レーザーダイシング装置を設置しユーザーの評価を得ると共に、装置メーカーへ技術供与し製品化へつなげる。

3. 実用化・事業化の見通し

(1) 成果の実用化可能性

本プロジェクトで得られた基礎データは全て公開されており、公的機関（大学、公益法人）による技術指導/移転を行う体制も整備されている。システムコンポーネント（レーザー装置、光学部品等）の単価も数百万円程度であり、中堅企業が当該技術を実用化する際の障壁は低いものと考えられる。

(2) 波及効果

本プロジェクトで得られた新しい知見は、大面積ガラスの割断に適用できる可能性があり、FPD（フラットパネルディスプレイ）等の製造技術として有用なものとなる可能性がある。レーザーによるガラス割断において、これまで困難とされてきたクロスカットの問題を解決できる可能性が高い。