

Nd:YAG レーザによる Si ウエハの切断加工に関する研究†

— 冷凍チャックシステムによる効果 —

山田啓司* 森田精一** 上田隆司*** 細川 晃*** 田中隆太郎***

Study on Cleaving Process of Silicon Wafer with Nd:YAG Laser
— Effect of Refrigerating Chuck System —

Keiji YAMADA, Seiichi MORITA, Takashi UEDA, Akira HOSOKAWA and Ryutarō TANAKA

In this paper, a refrigerating chuck system is developed to reduce the thermal damages of workpiece in laser cleaving process. The system reduces the surface temperature of table below the freezing point of water, and the work material is fixed on the table by the frozen water between the material and the table. The cooling capability of the system is investigated. The system is applied to the laser cleaving process of silicon wafer with cw-Nd:YAG laser.

The laser cleaving experiment of silicon wafer is conducted with Nd:YAG laser, then the width of thermal affected zone on the irradiated surface, the roughness of fractured surface and the deviation of cleaving trajectory are measured. The silicon oxide is caused on the surface of wafer in the room temperature, but the refrigerating chuck can prevent the thermal damage and improve the reliability of the cleaving process. By use of the chuck, the smooth fractured surface is achieved and the linearity of the cleaving trajectory is also improved.

Key words : Nd:YAG laser, silicon wafer, laser cleaving process, thermal damage, refrigerating chuck

1. 緒 言

CPU, メモリ, IC 等に用いられる Si 基板は, 近年の高集積化に伴う放熱の問題に対処するため, 薄型化がすすめられている. 薄型化はウエハの強度低下につながるため, ブレードによるダイシング工程ではチッピングが生じやすくなり, 工程後のテープ剥離時のウエハ破損の恐れや, ウエハ自体のハンドリングが困難となる問題も指摘されている¹⁾.

一方, 硬脆材基板へのレーザ照射によって生じる熱応力を利用した切断加工²⁾³⁾では, き裂を進展させてダイシングを行なうので, ウエハの薄型化によって加工性は向上すると考えられる. また, 非接触加工であることから工具帯電による電子回路破損の危険はなく, 工具交換ならびに加工液が不要なため加工コストの低減も期待できる.

これまで筆者らは, 熱損傷の小さいパルスレーザを用いた切断加工における照射条件と照射部温度の関係, き裂進展条件の詳細について検討してきた⁴⁾⁵⁾. これに対して連続照射レーザを用いた場合には, 熱損傷部がしばしば問題となるため, 基板を水冷する装置を付加することで熱損傷の軽減が試みられている⁶⁾⁷⁾. しかし, 冷却装置によって熱損傷軽減の効果はあるものの, 搬送テーブルから冷却装置へとウエハを移動させる工程を必要とし, 今後普及する薄型ウエハへの適用は困難であると考えられる.

そこで薄型基板の保持・搬送に適し, 同時にレーザ照射による熱損傷を抑制することを目的とした, 冷凍チャック装置を試作し, これを Si ウエハのレーザ切断加工に適用する. 同装置は比較的単純な構造からなっており, 従来の真空チャックへと組み込んで一体化することで, 電子回路形成からウエハのダイ

シング工程までを同一の保持装置によって搬送することも可能となり, 破損しやすい薄型ウエハの製造工程に適している. 本報では, 主として熱損傷軽減効果と加工精度への影響について調べた.

2. 冷凍チャックシステムの概要

2.1 装置構成

図1に, 今回作製した冷凍チャックの概略を示す. 熱伝導率に優れる銅板をバフ研磨仕上げしてステージを作製し, 裏面

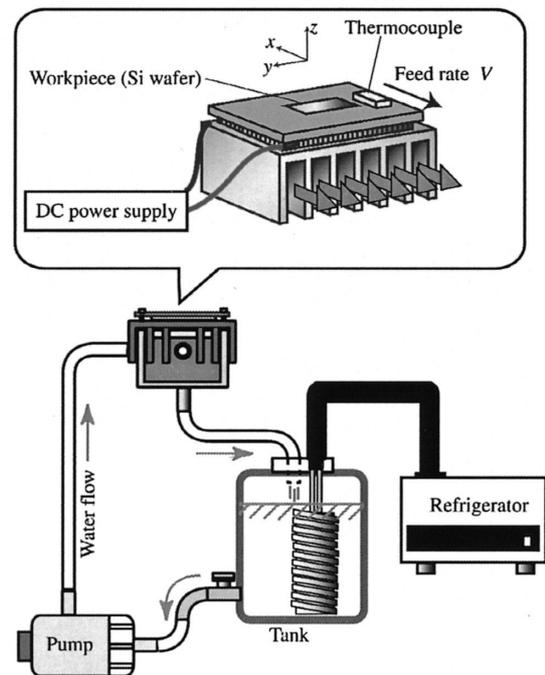


Fig.1 Schematic illustration of refrigerating chuck system

† 原稿受付 平成17年 6月 3日

* 正 会 員 広島大学大学院工学研究科(東広島市鏡山1-4-1)

** (株)ブルボン(柏崎市松波4-2-14)

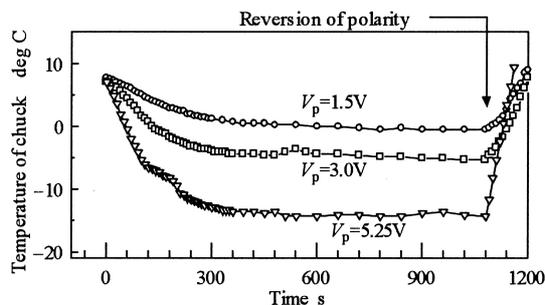
*** 正 会 員 金沢大学大学院自然科学研究科(金沢市小立野2-40-20)

に組み込んだペルチェ素子に電圧 V_p を印加してステージを冷却する。事前に蒸留水を滴下したステージ上に加工材料を載せ、蒸留水を氷結させることで加工材料を保持している。ペルチェ素子の放熱側は、ヒートシンクを介して冷却水により冷却する。安定した冷却効果を得るため、タンク内の冷却水は投げ込み式冷凍機にて一定温度 $T_w=6^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$ に保ち、ポンプで循環（流量 900mL/min）した。チャック部とポンプおよびタンクは柔軟なチューブにて接続しており、チャック部を自動ステージ上に設置して一定の送り速度 V を与えて割断加工を行なう。また、ステージ表面にはCA熱電対を設置してステージ面温度 T_c を監視しており、温度が定常となったことを確認して実験を開始した。

2.2 冷凍チャックの性能

図 2(a)に、ペルチェ素子に一定電圧 V_p を印加した際のステージ面温度 T_c の変化を示す。いずれの印加電圧においても、印加後6分で温度 T_c は一定温度に達しており、定常状態となったときの温度は、 $V_p=1.5\text{V}$ にて $T_c=0^\circ\text{C}$ 、 $V_p=3.0\text{V}$ にて $T_c=-5^\circ\text{C}$ 、 $V_p=5.25\text{V}$ にて $T_c=-15^\circ\text{C}$ となった。電圧印加後 18 分の時点でペルチェ素子に印加する電圧の極性を逆転させると、ステージ面に放熱を開始し約 1 分後には温度 T_c が融点より高くなって氷膜は融解し、保持していた加工材料を取り外すことができる。

定常温度に至る時間は V_p に依らないので、 V_p が高いほど冷却速度は大きい。そこで、初期に電圧を高く（ $V_p=7.5\text{V}$ ）し、目標温度（ $T_c=-5^\circ\text{C}$ ）に達してから低電圧（ $V_p=3.0\text{V}$ ）に変化させた場合の温度履歴を図 2(b)に示す。このとき、定常温度に



(a) Constant voltage

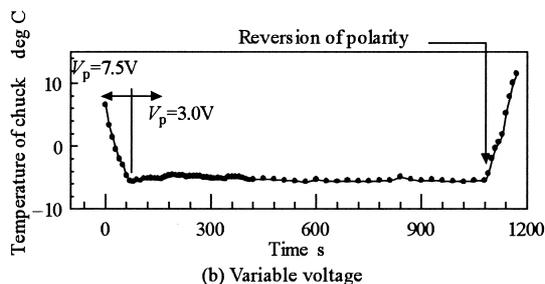


Fig.2 Temperature response of refrigerating chuck

Table 1 Experimental conditions in cleaving process

Workpiece	
Material :	Si wafer (surface {100} is irradiated)
Dimension :	10 X 20 X 0.5, 20 X 20 X 0.5 mm
Temperature :	-5°C, Room temperature
Feed rate V :	3.0 mm/s
Feed direction :	$\langle 0 \ 1 \ \bar{1} \rangle$
Distance from edge to cleaving trajectory : d	10, 1~7 mm
Nd:YAG Laser (CW)	
Wave length :	λ 1064 nm
Average power :	Q 50~135 W

達するまでの時間は約 1 分と大幅に短縮することができ、極性逆転後の温度上昇特性は一定電圧の場合と同様であった。

なお、割断実験に使用する Si 基板（寸法：10 X 20 X 0.5mm）を保持した状態（ $T_c=-5^\circ\text{C}$ ）で引張荷重を与えて引き剥がし試験をした結果、保持強度はステージ表面に対して鉛直（図 1 中にて z 方向）に 47.4kPa、ステージ表面に平行方向（図 1 中にて x 方向）に 179kPa であった。

3. レーザ割断実験

3.1 実験方法

レーザ割断加工実験は、図 1 に示した冷凍チャックを自動テーブル上に固定して行う。前報⁴⁾⁵⁾と同じく、加工物はき裂進展方向が Si ウエハ（ $t=0.5\text{mm}$ ）の 0.F. と同方向 $\langle 0 \ 1 \ \bar{1} \rangle$ となるよう、 $\phi 5$ インチウエハから切り出して作製し、照射開始位置にはビッカース圧子によって初期き裂を導入している。冷凍チャックの使用による熱損傷軽減効果、割断面精度の向上について検証する実験は、10 X 20 mm サイズのウエハ中心（端部から割断予定線までの距離： $d=10\text{mm}$ ）を割断位置とした。端部切り落し割断における端部の影響を検証する実験では 20 X 20 mm のウエハの端部近傍： $d=1 \sim 7\text{mm}$ を割断位置とした。

図 3 に示すように、研磨面に波長 $\lambda=1064\text{nm}$ の Nd:YAG レーザを連続照射しながら一定送り速度 $V=3\text{mm/s}$ を与えることでき裂はレーザスポットに追従して進展し、ウエハは割断される。レーザ走査線からの割断線のずれ量 Δd から割断線の直線性について評価するとともに、照射面の熱損傷および割断面の精度によって、冷凍チャック適用の効果について評価す

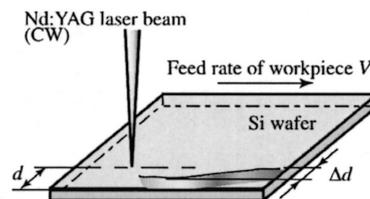


Fig.3 Schematic illustration of laser cleaving process of Si wafer

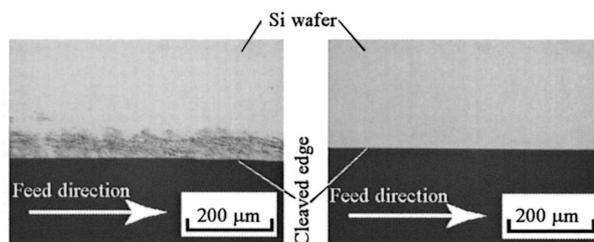


Fig.4 Photographs of irradiated surface of cleaved wafer

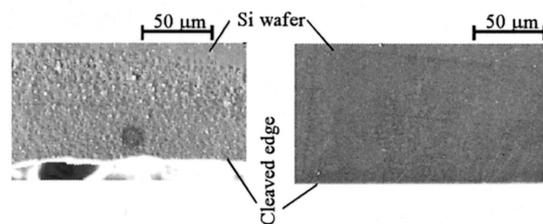


Fig.5 SEM images of irradiated surface of cleaved wafer

る。ステージ温度は -5°C で実験して、室温 (約 20°C) の結果と比較した。

3.2 冷凍チャックによる熱損傷軽減効果

切断加工後のレーザ照射面の切断部近傍を図 4 に示す。同図 (a) はステージ面温度を室温とした結果を示し、同図 (b) は $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ の結果である。図から、室温における切断部には帯状の熱影響部が存在しており、その幅 w_D は約 $70\mu\text{m}$ と目視でも確認できる。一方、冷凍チャックによって $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ に冷却した場合には熱影響部は観察されない。

図 5 に、図 4 と同様の部分を SEM 観察した画像を示す。図から、室温における切断にて生じた熱影響部には微小な粒状物質が分布しており、表面に微細な凹凸が形成されていることがわかる。これに対して $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ の場合には、照射面は切断線のごく近傍まで平滑で熱影響部が生じていないことがわかる。

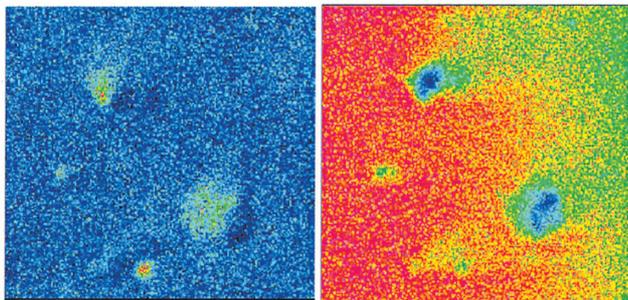
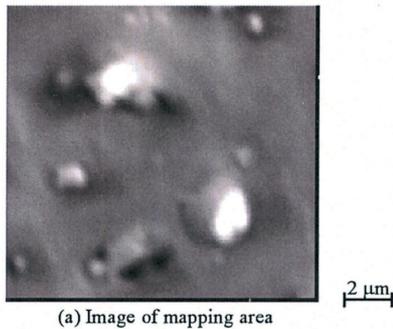


Fig.6 Element mapping on irradiated surface of wafer (room temperature)

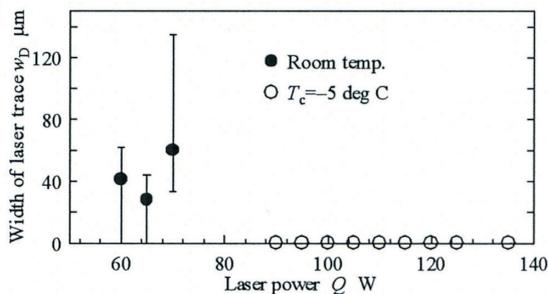


Fig.7 Relation between laser power and thermal damage

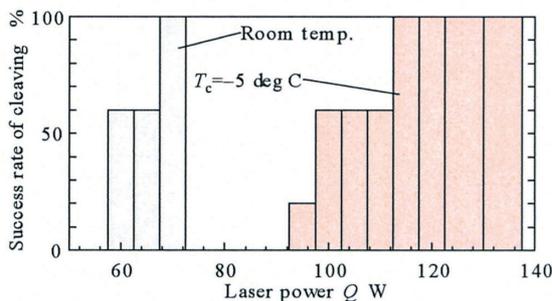


Fig.8 Relation between laser power and success rate of process

室温ウエハの切断において生じた影響部について EPMA によって元素分布状態を解析した結果が図 6 である。同図 (a) に示した領域における酸素の分布状態を図 (b) に、Si の分布状態を図 (c) に示しており、元素が多く分布している部分は暖色で、元素分布が少ない部分は寒色で表わされている。図 (b) および (c) から、影響部に生成された粒状物質には酸素が多く分布して相対的に Si は少なく、局部的に熔融した Si が粒状の酸化物として再凝固して付着していると考えられる。

大気圧下における Si の融点は 1414°C である⁸⁾ ことから、ウエハ切断加工において照射部が熔融するほど高温となることは、ウエハ上に作製された CPU やメモリ等の電子回路への熱損傷が懸念される。そこで、レーザ出力 Q を変化させ、熱影響部幅 w_D の関係を調べた結果を図 7 に示す。室温における切断加工では w_D はばらつきが大きいのが、 $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ においては $Q = 90 \sim 135\text{W}$ にわたって熱影響部は観察されない。

また図 8 には、レーザ出力 Q を変化させた場合の切断成功率をヒストグラムによって示している。室温、 $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ のいずれの場合においても、レーザ出力 Q が大きくなり、き裂の進展に十分な熱応力が生ずるようになると成功率は高くなる。室温の場合には $Q > 70\text{W}$ 、 $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ の場合には $Q > 115\text{W}$ の条件で 100% の成功率で安定した切断加工が可能となる。

図 7 および 8 の結果から、 $T_c = -5^{\circ}\text{C}$ と冷却すれば、き裂進展に必要な応力を発生するために照射しなければならないレーザエネルギーは高くなるものの、照射面に照射痕を残すことなく (すなわち $w_D = 0$)、確実に切断を行なうことが可能になるといえる。

3.3 冷凍チャックによる切断面への影響

切断加工後の切断面写真を図 9 に示す。図 (a) に示す室温で切断したウエハ断面は、照射面直下と断面下部に二分化されていて、切断面品位は低い。下部に残される規則的で微細な凹凸は、切断加工中にき裂が切断方向とわずかにずれた方向へと断続的に進展したために生じたと思われる。一方、図 (b) に示す冷凍チャックを使用した場合は、微細な凹凸もなく、非常に平滑で品位の高い切断面を得られている。

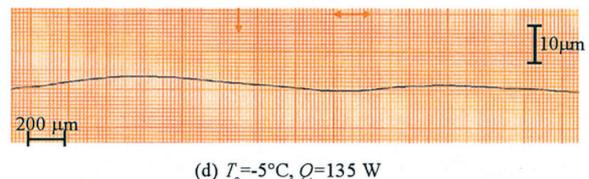
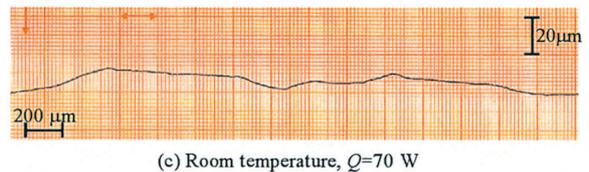
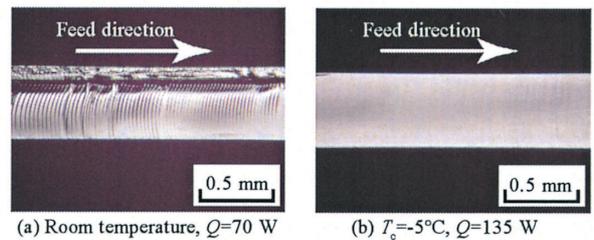


Fig.9 Photographs and profiles of cleaved surface of Si wafer

同図(c)(d)は室温及び $T_c = -5^\circ\text{C}$ の切断面プロファイル(測定長:3mm)である。両図を比較すると、冷凍チャック使用時には室温の場合に比べて、うねりが約1/2に減少しており、切断面の直線性が改善されていることがわかる。

さらに詳細に切断面品質を検討するため、あらさ Ra をウエハ送り方向に測定した結果をレーザー出力 Q との関係として、図10に示す。測定長は試料中央部の2.5mm、カットオフ値は0.8mmとした。図から、室温においては $Q=60\sim 75\text{W}$ の出力に対して $Ra=1\sim 5\mu\text{m}$ とばらついており、平均値が約 $2\mu\text{m}$ である。これに対して、冷凍チャックを使用した場合には、あらさのばらつきは最大でも $1\mu\text{m}$ 程度とはるかに小さく、平均値で $Ra=1\mu\text{m}$ と非常に優れた切断面を得ていることがわかる。

3.4 冷凍チャックによる切り落とし切断への影響

切断加工におけるき裂進展方向の精密な制御は、現在でも種々の方法が研究されている⁹⁾。特に加工材自由端近傍の切り落とし切断においては、き裂が自由端へ近づいてしまい、切り落とし片の寸法精度が悪化することが報告されている¹⁰⁾¹¹⁾。これは、自由端とき裂間の距離が小さいため、レーザー走査線(=切断予定線)を中心とした温度分布が非対称となることが原因である。そこで、冷凍チャックによりウエハを冷却した際の切り落とし切断における切断精度について調べた。

図11に示す写真は、20mm幅の試験片の自由端から $d=5\text{mm}$ の位置にレーザーを照射し、ウエハの自由端側を $5\times 20\text{mm}$ の帯

状に切り落とし切断した後に、切り落とし側片および固定端側片の照射面を観察した例である。室温において切断加工を行なったので、図4,5で示したものと同様の照射痕が切断後の両試験片の照射部に残されている。同図においては下側部材が切り落としたウエハ、上側が固定端側である。両者に残された照射痕幅が異なるのは、上述した温度分布の非対称性のために、切断線がレーザー走査線の中心を進展せず、切り落とし側へとずれたためである。

照射痕が明確に観察できる条件下では、図11に示したような観察結果から切断線のずれ量を計測できる。しかしながら、冷凍チャック($T_c = -5^\circ\text{C}$)を用いて切断加工を行なう場合には照射痕が形成されない場合が多いため、顕微鏡観察によって照射痕と切断線の相対位置を調べることは切断線ずれ量 Δd を計測できない。そこで、切断面形状を触針式あらさ計で測定することから、切断線のずれ量 Δd を求めた。自由端から切断位置の距離 $d=2\text{mm}$ とした場合の切断面プロファイル例を図12に示す。同図に示すように切断部全長20mmのうち中央部15mmの測定プロファイルから、切断線のずれ量 Δd を定義した。

切断位置 d と切断線ずれ量 Δd の関係を図13に示す。室温における切断では、切断位置が自由端から遠ざかって d が増大し、切り落とし寸法が大きくなるとともに温度分布の非対称性が軽減されるため、 Δd は減少している。最もずれ量が小さくなるのは、材料中央部を切断する場合($d=10\text{mm}$)で、ずれ量はおおよそ $30\mu\text{m}$ である。

一方、冷凍チャックによって $T_c = -5^\circ\text{C}$ に冷却した場合には、室温時に比較してずれ量 Δd は小さく、 Δd のばらつきは著し

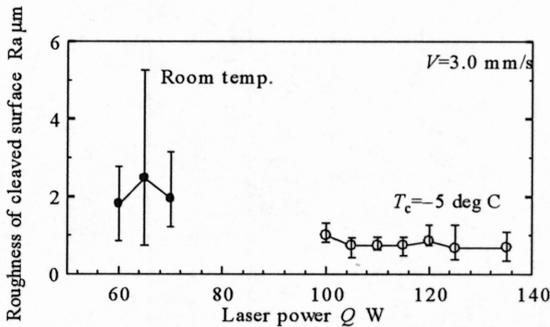


Fig.10 Roughness of cleaved surface of Si wafer

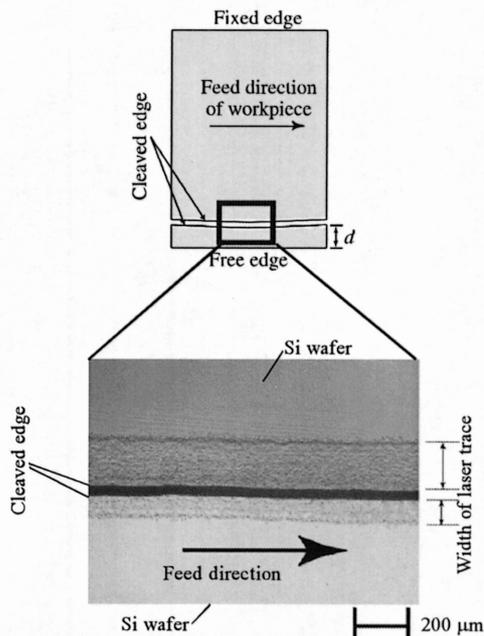


Fig.11 Deviation of cleaving trajectory (room temperature, $d = 5\text{mm}$)

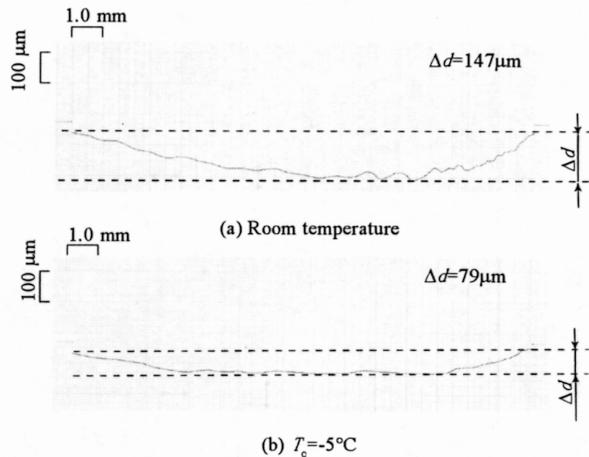


Fig.12 Profile of cleaved surface ($d = 2\text{mm}$)

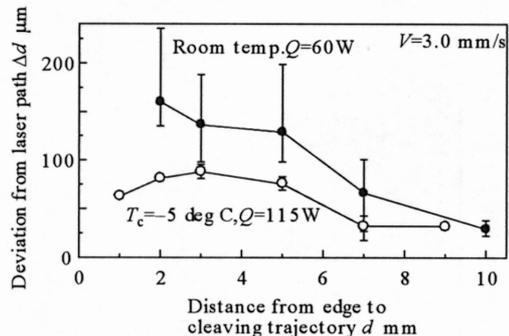


Fig.13 Relation between cleaving position and deviation of trajectory ($V = 3.0\text{mm/s}$)

く減少している。最小ずれ量は室温時の場合と等しく、 $30\mu\text{m}$ であった。

また、割断位置が $d=1\text{mm}$ と最も自由端に近い位置で割断を行なった場合、室温においては照射面に熱影響部のみが残ってき裂は進展せず、割断できなかったのに対して、 $T_c=-5^\circ\text{C}$ では $d=1\text{mm}$ でも $\Delta d=80\mu\text{m}$ 程度の精度で割断可能と、切り落とし寸法の微小化にも冷凍チャックの効果を確認できた。

4. 結 言

本論文では、加工材の保持と冷却機能を備えた冷凍チャックシステムを開発し、連続発振の Nd:YAG レーザによる Si ウエハの割断加工に適用した。得られた加工物の品質について熱影響部や割断面あらさ等から評価を行い、冷凍チャックシステムの効果について検証した。本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 開発した冷凍チャックでは、ペルチェ素子によって -15°C のステージ温度を安定して得られる。ステージ温度 -5°C に冷却すれば、レーザー割断における熱影響部を抑制できた。
- (2) 起動時に高い電圧を負荷することで冷凍チャックの応答性を改善でき、1分間でステージ温度を -5°C まで冷却できる。このときの保持力は、鉛直方向に 47.4kPa 、平行方向に 179kPa であった。
- (3) 室温の Si ウエハを連続発振の Nd:YAG レーザによって割断加工した場合、照射部には Si の熔融再凝固した酸化物が粒状に付着していることを EPMA 分析によって確認した。
- (4) 冷凍チャックの適用によって、ウエハの割断面あらさは $Ra=1\mu\text{m}$ と平滑な優れた面が得られた。あらさのばらつきも室温時に比べて $1/5$ 程度と飛躍的に向上することができた。
- (5) ウエハの自由端近傍の切り落とし割断に冷凍チャックを適用した場合、最小切り落とし幅は 1mm と室温時に比べて小さい切り落としが可能となった。また、室温時よりも

冷却時の方が割断線のずれ量は小さく、ずれ量のばらつきも顕著に改善されることがわかった。

謝 辞

EPMAによる元素分布分析にご協力頂いた石川県工業試験場古本達明氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 荒井一尚：ダイシング，機械と工具，**44**，5(2000)59.
- 2) 沖山俊裕：レーザー割断，精密工学会誌，**60**，2(1994)196.
- 3) R. M. Lumley：Controlled Separation of Brittle Materials Using a Laser, The American Ceramic Society Bulletin, **48**, 9(1969)850.
- 4) 山田啓司，大磯桂一，細川晃，上田隆司：パルス YAG レーザによる Si ウエハの割断機構に関する研究，精密工学会誌，**67**，11(2001)1861.
- 5) 山田啓司，西岡真吾，細川晃，上田隆司：パルス YAG レーザによる脆性材料の割断加工 —Si ウエハ割断における熱応力解析—，精密工学会誌，**69**，1(2003)120.
- 6) 黒部利次，市川和浩，永井久司：YAG レーザによるシリコンウエハの割断，材料，**44**，497(1995)159.
- 7) 黒部利次，野口通一，松本貴宏：YAG レーザによるシリコンウエハの精密割断 —鏡面冷却二重照射割断—，精密工学会誌，**62**，1(1996)1018.
- 8) 国立天文台：理科年表，丸善(1999)469.
- 9) M.J. Uddin，池野順一，中野康範，中村知史，河西敏雄：レーザーマイクロ割断に関する研究 (第2報)，2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2002)371.
- 10) C. H. Tsai, C. J. Chen：Application of Iterative Path Revision Technique for Laser Cutting with Controlled Fracture, Optics and Lasers in Engineering, **41**, 1(2004)189.
- 11) 今井康文，才本明秀，木村文孝：移動熱源による自由縁近傍の熱応力割断，日本機械学会論文集(A編)，**68**，670(2002)147.