単結晶シリコンの精密レーザスライシング技術*

山 田 洋 平** 池 野 順 一** 鈴 木 秀 樹***

Precision Slicing of Single Crystal Silicon Using Laser Slicing Technology

Yohei YAMADA, Junichi IKENO and Hideki SUZUKI

A laser slicing technology is proposed as a new high precision slicing method for semiconductor substrates so as to realize slicing thin wafer with small material loss. In this method, appropriate focusing of laser beam can introduce micro cracks inside the material, which are connected by series of laser scanning. Observation in the laser slicing of single crystal silicon wafer under various process conditions revealed mechanism of this method. A crack was propagated along the cleavage face $\{111\}$ and $\{110\}$. The sliced face was created by linkage of the cleavages. In addition, the silicon wafer of 1-inch was successfully sliced, and uniform sliced surface could be obtained. However, wafer warpage was generated by residual stress.

Key words: laser slicing, laser cutting process, semiconductor, Si

1. 結 言

近年, AI, IoT, データセンター, 自動車用センサー, パワーデバイスなどの需要増加に伴い半導体需要が増加している。次世代の半導体材料として SiC, GaN などが注目されているが, 製造・加工コスト, 信頼性, 適用範囲の広さなどの観点から単結晶 Si ウエハの優位性は変わらず, 需要は今後も伸びつづけると考えられる¹⁾²⁾。

Si ウエハ製造工程における課題の 1 つはインゴットのスライシング加工である。これまでワイヤソーが用いられているがワイヤ径の制約上, 切り代はこれ以上小さくならず, 約 50% の Si が廃棄されている^{3)~5)}。そこで, 材料ロスの少ない精密な切断方法の開発が求められている。単結晶 Si に対する精密ダイシング技術の研究例として, 大村らによるステルスダイシング法が挙げられる。Si 内部にナノ秒レーザを集光し, 材料内部に形成されたき裂を光軸方向に伸展させ, ウエハを厚み方向に切断する手法である⁶⁾⁷⁾。本手法は, 切り代微小, デブリなし, 鋭いエッジを保ったまま Si ウエハをダイシングする手法であるが, スライシング加工のようにウエハ面と平行方向に切断することはない。

そこで, 筆者らは新たにレーザスライシング技術を提案している⁸⁾。レーザを材料内部に集光し, 隣り合う微小内部き裂を一つ一つ連鎖させるように面状に形成することで, 非接触かつクリーンに切り代が少ない精密スライシング加工を実現する技術である。本論文では, まず単結晶 Si のレーザスライシングにおいて, 加工条件に対するき裂形状の変化に着目し, 加工メカニズムを明らかにし, 加工条件の同定を試みた。次に, 1 インチウエハのスライシング加工を行い, 剥離応力, 表面粗さ, 形状精度を測定することによってスライシング加工特性を評価することにした。

2. レーザスライシングの原理と実験装置

2.1 加工原理

レーザスライシングとは図 1 に示すように, 材料内部にレーザを集光し, 材料内部に微小内部き裂を形成, それをレーザ走査によって一つ一つ精密に連結させていくことにより, スライシング加工を実現する技術である。微小出力のレーザにより数 μm オーダーの微小なき裂を繋げていく加工であるため, 切り代・熱影響が微小で, 材料の結晶方位の影響を大きく受けずに精密加工が可能である。我々の研究チームではサファイアガラス, Si, SiC などのスライシング加工を試み, その有用性を実証している^{9)~11)}。また, 内部き裂を 3 次的に配列し 3 次元加工にも成功している¹²⁾。そこで, 実用化に向けてレーザスライシング技術の詳細な加工特性を明らかにすることが求められている。

2.2 実験装置

試料の透過率を分光光度計 (島津製作所製 UV-3550) によって測定した結果を図 2 に示す。厚み 725 μm の単結晶 Si は波長 1064 nm 付近の近赤外線を約 28 % 透過させるため, 材料内部まで侵入したレーザを集光させれば内部き裂を形成することができる。そこで, 実験には波長 1064 nm, パルス幅 190 ns の近赤外ナノ秒パルスファイバーレーザ (イエナオプティック社製, JenLas fiber ns 20 Advanced single mode, TEM₀₀, ビーム径 2 mm) を用いた。集光系には市販の赤外線観察用対物レンズ (オリンパス社製 LCPLN100XIR, 開口数 0.85) を用いた。本対物レンズには収差補正環が付属しており, 材料内部においてもピンポイントに集光させることが可能である。ビームプロファイラによるスポット径測定では, 大気中で $\phi 1.7 \mu\text{m}$ に対し, 材料内部の 362.5 μm 地点では補正環を使用することにより $\phi 1.8 \mu\text{m}$ となった。これらの光学系を超精密加工機 (東芝機械社製 ULG-100) に搭載した。これにより再現性の高い精密加工実験が可能である。

Fig.1 Principle of laser slicing technology

* 原稿受付 平成 30 年 9 月 19 日

掲載決定 平成 31 年 2 月 15 日

** 正 会 員 埼玉大学大学院 (さいたま市桜区下大久保 255)

*** 信越ポリマー株式会社 (東京都千代田区神田須田町 1-9)

3. 基礎実験における Si の内部き裂観察

基礎実験として Si の内部き裂観察を以下のように行った。

3.1 実験方法

実験方法の概略図を図3に示す。用いた Si 試料は面方位 (100), CMP 仕上げ (0.182 nmSa, 1.613 nmPV), オリエンテーションフラット方位 [011], 厚み 725 μm である。これを加工機の回転軸にある真空チャックに固定し, Si 表面下 362.5 μm にレーザを集光させた。レーザの走査軌跡はウエハ外周部より, らせんを描きながらウエハ中心部へと向かうようにした。

また, Si の結晶面の模式図と観察方向を図4に示す。図4(a)に示すように Si には等価なへき開面群が3種類あり, それぞれ黒塗り部を {111}, 斜線部 {110}, 白抜き部を {100} で示している。図4(b)はき裂の観察方向を示している。オリエンテーションフラット面と平行方向に断面研磨した {110} の観察と, 45°方向に断面研磨した {100} の観察を行った。

3.2 内部き裂形成に及ぼす影響因子

ここでは内部き裂形成の基礎的な特性を調べるために, 3つの基礎実験を行い, き裂の赤外線顕微鏡による観察と断面研磨による直接観察を行った。既報¹⁰⁾において, 内部き裂をウエハ面と垂直方向に連結させた際の基礎的なき裂形状変化については報告済みであるが, 本報では内部き裂の連結方向が異なる。そのため, 切り代に影響する光軸方向のき裂長さ, スライシング

に影響するウエハ面と平行方向へのき裂連結に着目して実験を行った。

まず, 実験1としてレーザパルスエネルギーの影響を調査した。レーザ照射で内部に発生した熱によって Si はアモルファス化し, 体積膨張でき裂が伸展すると考えられている⁹⁾。したがって, き裂を微小化し切り代の少ない精密切断を実現するためには, き裂が安定的に形成される範囲において, 最小のパルスエネルギーで加工することが有効だと考えた。次に, 実験2としてレーザ走査方向の隣り合うき裂の間隔(ドットピッチ)の影響を調査した。本加工法はき裂を一つ一つ確実に連結させることによって切断が可能になるため, き裂間隔を小さくすれば, き裂同士が連結しやすくなり, き裂の伸展が進むと考えた。同様に実験3として加工ライン同士の間隔(ラインピッチ)の影響についても調査し, スライシング加工で重要となるウエハ面と平行方向の連結を明らかにすることにした。

① 実験1：内部き裂に及ぼすパルスエネルギーの影響

加工条件を表1中の①に示す。2.0 μJ より小さいパルスエネルギーではき裂が形成されなかったため, 2.0 μJ 付近が本実験条件における加工しきい値であると考えた。そこで, 実験ではレーザパルスエネルギーを 2.0 μJ , 2.3 μJ , 3.0 μJ , 5.0 μJ , 10.0 μJ とした。またドットピッチとラインピッチについては, 既報¹⁰⁾において狭く加工した場合, 直前に照射されたレーザの影響を受け, き裂が成長することが認められている。したがって単発照射によるパルスエネルギーの影響のみを抽出するために, それぞれ 20 μm と大きく設定し影響を排除した。以上の条件でそれぞれ7回の加工実験を行い, 加工後は断面研磨しき裂を露出させ, {110} から光学顕微鏡で観察を行った。

観察結果を図5に示す。パルスエネルギーが 2.0 μJ , 2.3 μJ と小さい条件では, き裂が光軸方向に直線的に伸展しているが, 3.0 μJ 以上の条件では, き裂上部でき裂が Y 字や X 字のように分岐して成長していることがわかった。これは結晶方位の影響と考えられる。すなわち単結晶 Si では {111}, {110}, {100} の順にへき開しやすいことが知られている¹³⁾¹⁴⁾。そのため応力拡大係数の大きくなるき裂端部において¹⁵⁾, アモルファス Si 化による体積膨張によって強い引張応力が生じ {111} または {110} に沿って斜めにへき開が成長したと考えられる。また, 10.0 μJ と体積膨張が最も大きくなると考えられる条件では {100} に沿ったと考えられる水平方向に伸びるへき開も観察できた。

次に, パルスエネルギーごとの光軸方向のき裂長さ, 標準偏差 (3σ) を図6に示す。2.0 μJ ではき裂長さが $2.7 \pm 1.7 \mu\text{m}$ と最小となったが, ばらつきが大きいことがわかった。これは, 加工しきい値に近く, き裂の形成が不安定になったためであると考えられる。2.3 μJ では $3.8 \pm 0.7 \mu\text{m}$ と短く, ばらつきの小さい安定したき裂形状となった。一方, 3.0 μJ では $7.0 \pm 1.4 \mu\text{m}$ と, この条件を境にして長く成長し, 10.0 μJ では $9.0 \pm 3.4 \mu\text{m}$ となった。これは, 図5で示した {111}, {110} に沿ったへき開の影響と考えられ, 既報で示した約 7 μm 以下となれば結晶方位の影響を受けづらいという結果と一致している¹⁰⁾。

Si のレーザスライシング加工は, 隣り合う内部き裂を面状に一つ一つ精密に繋げていくため, レーザ光軸方向へのき裂の成長は, 加工精度の悪化と切り代の増大に繋がるため好ましくない。そこで, 以降の実験では, 確実にき裂を形成可能で, き裂長さが最短となるレーザパルスエネルギー 2.3 μJ に固定し実験を行うことにした。

Fig.2 Transmittance of single crystal silicon

Fig.3 Experimental setup of laser slicing

Fig.4 Crystalline plane of single crystal silicon and observation direction

Table 1 Experimental conditions

	① Experiment 1	② Experiment 2	③ Experiment 3
Pulse energy μJ	2, 2.3, 3, 5, 10	2.3	2.3
Dot pitch μm	20	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5	1
Line pitch μm	20	20	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5
Number of line	20	20	20
Wavelength nm		1064	
Pulse duration ns		190	
Frequency kHz		500	
NA		0.85	
Aberration correction mm		0.6

Fig.5 Influence of pulse energy on crack shape

Fig.6 Influence of pulse energy on crack length

② 実験2：き裂に及ぼすドットピッチの影響

次にドットピッチを $0.5 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$, $5.0 \mu\text{m}$ として線状のき裂を形成する実験を行った。加工条件は表1中の②に示す。

加工後の Si 内部を赤外線顕微鏡によって観察した結果を図7に示す。ドットピッチ $5.0 \mu\text{m}$ では独立した規則的な点状のき裂が観察された。ドットピッチ $3.0 \mu\text{m}$ 以下に短くなると互いに連結していき、図中に矢印で示す箇所のように、加工ラインの幅を超え外側に広がっていることがわかった。これは前節で見られた結晶方位に沿ったへき開が、所々伸展したものと考えられる。

次に断面観察を行った。ここでは $\{110\}$ からの観察結果を図8(a)に示す。また、 $\{100\}$ からの観察を図8(b)に示す。それぞれ $\{111\}$ に沿ったへき開の伸展と $\{110\}$ に沿ったへき開の伸展が確認できた。

き裂長さの測定結果を図9に示す。各ドットピッチで7回の実験を行い、そのき裂長さの平均値と 3σ の標準偏差を示している。ドットピッチが $0.5 \mu\text{m}$ のとき $\{110\}$ からの観察で $16.1 \pm 3.6 \mu\text{m}$, $\{100\}$ からの観察で $15.3 \pm 3.9 \mu\text{m}$ となった。ドットピッチが $5.0 \mu\text{m}$ のときは $\{110\}$ からの観察で $5.4 \pm 1.6 \mu\text{m}$, $\{100\}$ からの観察で $5.4 \pm 2.0 \mu\text{m}$ となった。ドットピッチが短いときには、蓄熱や加工変質部、へき開部にオーバーラップして照射されることによる光吸収係数の上昇によって、き裂が成長したものと考えられる⁹⁾¹⁵⁾。材料内部でのレーザのスポット径は $\phi 1.8 \mu\text{m}$ であるため、ドットピッチ $1.5 \mu\text{m}$ 以下ではレーザ照射部にオーバーラップして照射されるが、ドットピッチ $2.0 \mu\text{m}$ 以上でもき裂の成長が見られる。これは蓄熱の影響だと考えられる。Si の熱拡散長は 190 ns で $8 \mu\text{m}$ 程度であるため、ドットピッチ 5.0

Fig.7 Infrared microscopic image on dot pitch difference

Fig.8 Influence of dot pitch on crack shape

Fig.9 Influence of dot pitch on crack length

μm においても蓄熱の影響を受けたと考えられる。また、結晶方位によるき裂長さへの差はないことが明らかになった。

以上のことから、内部き裂を線状に形成した場合、ドットピッチが短くなると、隣り合うレーザ照射、き裂の影響によってへき開が成長し、き裂同士が連結し始めることがわかった。また、パルスエネルギーが小さい条件においては、ウェハのどの位置にレーザ照射しても結晶方位の影響は受けづらいことがわかった。

③ 実験3：内部き裂に及ぼすラインピッチの影響

次にラインピッチを $0.5\ \mu\text{m}$, $1.0\ \mu\text{m}$, $1.5\ \mu\text{m}$, $2.0\ \mu\text{m}$, $3.0\ \mu\text{m}$, $5.0\ \mu\text{m}$ として加工実験を行った。加工条件は表1中の③に示す。ドットピッチは、き裂長さが比較的短く、き裂同士が確実に連結した $1.0\ \mu\text{m}$ とし、ライン走査を20回行い面状にき裂を形成した。

加工後のSi内部を赤外線顕微鏡によって観察した。その結果を図10に示す。結晶方位の影響を見るために、オリエンテーションフラット面と垂直に走査した結果(図10(a))と45度方向に走査した結果(図10(b))を比較した。ラインピッチ $5.0\ \mu\text{m}$ の条件では加工ライン同士は独立しているが、 $3.0\ \mu\text{m}$, $2.0\ \mu\text{m}$ においては加工ライン間でき裂が繋がり始めていくことがわかった。そして、 $1.5\ \mu\text{m}$ において不規則に連結し始め、 $1.0\ \mu\text{m}$ 以下では加工ラインに沿った規則的な点状のき裂が観察されなくなり、不規則に連結したような面が支配的となることがわかった。なお、結晶方位による大きな違いは見られなかった。

断面観察結果を図11に示す。実験2と同様に $\{110\}$ 方向からの観察と $\{100\}$ 方向からの観察を行った。き裂上部の $\{111\}$ $\{110\}$ に沿ったへき開同士が連結していくことがわかった。ラインピッチ $5.0\ \mu\text{m}$ においては所々連結が途切れているのに対し、ラインピッチが短くなるにつれ、複数のへき開が絡み合うように連結していくことがわかった。き裂長さと 3σ の標準偏差を図12に示す。ラインピッチ $0.5\ \mu\text{m}$ では $21.6 \pm 2.9\ \mu\text{m}$ と長く成長しているのに対し、ラインピッチ $5.0\ \mu\text{m}$ では $12.2 \pm 1.3\ \mu\text{m}$ 程度となった。したがって図10で示した赤外線顕微鏡像における不規則な面は、絡み合うように連結したへき開によるものであることがわかった。

以上から、き裂を面状に形成することにより、き裂上部で分岐したへき開同士がスライシング面に沿って連結し、剥離はこの面に沿って起こると推測される。

4. 1インチウエハのレーザスライシング加工

4.1 加工実験

これまでの基礎実験でSi内部のき裂形成に与える影響要因が明らかになった。そこで、1インチSiウエハに対し内部き裂を全面に形成して、スライシング加工を行い、剥離面性状、形状精度について調査を行うことにした。加工実験方法は3.1同様として、加工条件はパルスエネルギーを $2.3\ \mu\text{J}$ 、ドットピッチを $1\ \mu\text{m}$ 、ラインピッチについては $0.5\ \mu\text{m}$, $1.0\ \mu\text{m}$, $1.5\ \mu\text{m}$, $2.0\ \mu\text{m}$, $3.0\ \mu\text{m}$, $5.0\ \mu\text{m}$ と変化させた。加工時間はそれぞれ36 min, 18 min, 12 min, 9 min, 6 min, 4 minであった。内部き裂形成後、ウエハ両面にジグをエポキシ接着剤で貼り付け、万能試験機によって(100)面と垂直方向に正確にウエハを引張り、一様に剥離させた。

4.2 加工評価

① 剥離応力および剥離面観察

引張試験の結果、ラインピッチ $0.5\ \mu\text{m}$ と $1.0\ \mu\text{m}$ で加工したウエハで全面剥離した。それぞれの平均剥離応力は $5.49\ \text{MPa}$ ($2782\ \text{N}$)、 $16.52\ \text{MPa}$ ($8371\ \text{N}$) となった。一方のラインピッチが $1.5\ \mu\text{m}$ 以上と大きい条件では、剥離応力が接着強度を超えウエハとエポキシ接着剤の界面で剥離したことから、へき開の連結が不十分だったと考えられる。したがってラインピッチが、小さくなるほど剥離応力が小さくなり剥離が容易になることがわかった。また、ウエハの剥離面外観を図13に示す。剥離面は目視では一様な梨地面となっており、上面、下面ともに違いは見られなかった。

Fig.10 Infrared microscopic image on line pitch difference

Fig.11 Influence of line pitch on crack shape

Fig.12 Influence of line pitch on crack length

Fig.13 Appearance of sliced surface

② 剥離面粗さの評価

詳細な剥離面の評価を行った。剥離面の上面、下面の顕微鏡写真を図14に示す。観察箇所は、{111}の影響が出ると考えられるウェハ中心からオリエンテーションフラットと平行方向(0 deg.)の箇所と、{110}の影響が出るオリエンテーションフラットから45度方向(45 deg.)の面とし、剥離面の均一性を確かめるためにそれぞれ中心から半径方向に2 mm, 6 mm, 12 mm地点を観察した。図より上下面共に細かくへき開面が形成されており、いずれもレーザ走査方向に従っていることから加工ライン間でへき開が連結していることがわかった。ラインピッチ0.5 μmと1.0 μmを比較すると、ラインピッチ1.0 μmの剥離面は、図中白く見える加工ラインに沿ったへき開面の乱れ、大きく連結した箇所が見られ、凹凸の大きい面となっていることがわかった。また、図中で黒く見えるむしれている凹凸も存在した。これは、剥離応力の違いからもわかるように、ラインピッチが大きくなったことで、加工ライン間でのへき開同士が連結が不十分となり、万能試験機による引張応力によって強制的にへき開が連結したためであると考えられる。

次に、測定範囲における表面粗さの測定結果をラインピッチ0.5 μmを図15に、ラインピッチ1.0 μmを図16に示す。ラインピッチ0.5 μmにおいては、算術平均粗さ、最大高さともに結晶方位、上下面による大きな違いは見られず、上面0度では0.353 μmRa, 2.447 μmRz。上面45度では0.357 μmRa, 2.478 μmRz。下面0度では0.363 μmRa, 2.437 μmRz。下面45度では0.378 μmRa, 2.511 μmRzとほぼ同じ値となった。

一方、ラインピッチ1.0 μm条件下における表面粗さは、平均で0.508 μmRa, 2.573 μmRzと、ラインピッチ0.5 μmの平均0.362 μmRa, 2.468 μmRzと比較して高い値となった。また、図16(b)に示す最大高さ粗さにおいて、45度の面で0度の面と比較して22%ほど高い値を示すことがわかった。これは引張応力によって強制的に剥離させた結果、結晶方位の影響を受けたためと考えられる。すなわち0度の面では{110}、45度の面では{111}のへき開が支配的となる。単結晶Siは{111}でのへき開性が強いいため、引張応力によって大きく伸展・連結して剥離したと考えられる。

また、表面粗さの傾向として、ウェハ外側が大きく、内側では小さくなる傾向があることがわかった。これは、内側へ行くに従いへき開が密に連結していることを示していると考えられる。本実験では、レーザを外側から内側へらせん状に走査させてい

る。したがって、内側に熱が蓄積しやすい。そのため、光吸収係数が上昇し、加工ライン間でのへき開の成長が促されたと考えられる。

以上の結果より、Siのレーザスライシング加工において、内部き裂を密に形成することで、き裂同士が密に連結し、剥離の容易さ、表面粗さが向上することがわかった。

③ 剥離面形状精度の評価

非接触式3次元測定機(三鷹光器製 NH-3N)を用いてラインピッチ0.5 μmにおける剥離面全面の形状を測定した。その3次元測定結果を図17に示す。加工むらのないような剥離面となっていることがわかった。しかし上側剥離面では最大30.6 μmの凹形状、下側剥離面では最大31.7 μmの凸形状となった。現状、これは残留応力による反りであると推測している。Siのレーザスライシングはレーザ照射による熱によってき裂を形成している。そのため内部き裂周囲には変質層(アモルファスSi)の体積膨張による残留応力が形成され、剥離と同時にそれが開放されるため反りが生じたと考えられる。この反りの除去のためには、後工程で変質層を除去する必要がある。本加工条件では図12に示したようにき裂長さが22 μm程度存在するため、研磨代は30 μm程度となると考えられる。

以上の結果より、現状では反りの除去のため、切り代は30 μm程度となることがわかった。反りを改善するためには、レーザスライシングにおける反りのメカニズム解明と共に、レーザ照射による熱影響部を小さくすることが有効であると考えられ、さらなる内部き裂微小化、レーザ走査方法の工夫、加工条件最適化が今後の課題である。

5. 結 言

単結晶Siのレーザスライシング加工において、加工条件に対するき裂形状の変化に着目し、剥離メカニズムを明らかにした。また、スライシング加工後の剥離面の測定を行うことによって、本加工法に適した加工条件の同定、加工特性評価を行った。

- (1) 波長1064 nmのナノ秒パルスレーザを材料内部に集光することで、ミクロンオーダーの微小内部き裂が形成される。き裂はレーザ光軸方向に向かい直線状に形成され、き裂上部でへき開面{111}、{110}に沿って分岐する。
- (2) 内部き裂を線状に形成すると、前のレーザ照射の影響を受けき裂が成長する。ドットピッチが2.0 μm以下の領域ではき裂上部のへき開が大きく成長し連結する。
- (3) 内部き裂を面状に形成すると、き裂上部のへき開同士が絡み合うように連結し、加工ライン間で連結しへき開面が細かく形成される。このへき開面がスライシング面に沿って形成されることで剥離が可能となる。
- (4) 1インチウェハに内部き裂を全面加工することにより、ウェハの剥離に成功した。剥離応力はドットピッチ0.5 μmの条件で5.49 MPa。ドットピッチ1.0 μmの条件で16.52 MPaとなり、内部き裂を密に形成することにより低い剥離応力でスライシングすることができる。
- (5) 剥離面はへき開面が加工ライン間で連結することによって形成され、内部き裂を密に形成することで、細かく連結し表面粗さが向上する。表面粗さは平均で0.362 μmRa, 2.468 μmRzとなった。
- (6) 1インチウェハの剥離面において、剥離面上部は凹形状、下部は凸形状と30 μm程度の反りが発生する。内部き裂周りに発生する残留応力によるものと考えられる。

Fig.14 Microscopic image of sliced surface

Fig. 15 Surface roughness of sliced surface (Line pitch : 0.5 μm)

Fig. 16 Surface roughness of sliced surface (Line pitch : 1.0 μm)

Fig.17 Flatness measurement of sliced surface (Line pitch : 0.5 μm)

参 考 文 献

- 1) WSTS : WSTS Semiconductor Market Forecast Spring 2018, 2018 2.
- 2) 富士経済 : 2018 年版 次世代パワーデバイス&パワーエレクトロニクス関連機器市場の現状と将来展望, (2018) 5.
- 3) 大石弘, 浅川慶一郎, 塚本和繁, 宇野義幸 : マルチ・ワイヤソー切断におけるワイヤ走行速度およびインゴット送り速度の効果, 精密工学会誌, **67**, 5 (2001) 791.
- 4) 諏訪部仁, 浦柄昭典, 上野智尚, 服部崇将, 石川憲一 : 樹脂コーティングワイヤを用いた鏡面スライシング加工に関する研究, 砥粒加工学会誌, **55**, 12 (2011) 733.
- 5) 鈴木孝彰, 大槻俊紀, 関紀旺 : ダイシングワイヤソーによる単結晶シリコンの精密切断に関する研究, 砥粒加工学会誌, **60**, 2 (2016) 32.
- 6) E. Ohmura, F. Fukuyo, K. Fukumitsu, H. Morita : Internal modified-layer formation mechanism into silicon with nano second laser, J. Achievement Materials Manufacturing Eng., **17** (2006) 381.
- 7) E. Ohmura, M. Kumagai, M. Nakano, K. Kuno, K. Fukumitsu, H. Morita : Analysis of Processing Mechanism in Stealth Dicing of Ultra Thin Silicon Wafer, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **2**, 4 (2008), 540.
- 8) 伊東宏季, 池野順一, 鈴木 秀樹, 国司洋介: YAG レーザを用いたシリコンの薄化技術, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2009) 3.
- 9) 茶花幸一, 池野順一: サファイアのレーザスライシングに関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2011) 159.
- 10) 山田洋平, 金子洋平, 青木陸, 池野順一, 鈴木秀樹 : レーザによる微小内部亀裂連鎖に基づく半導体結晶材料の高品位切断加工, 精密工学会誌, **83**, 4 (2017) 375.
- 11) 山田洋平, 阿部達毅, 浅原浩和, 富士和則, 明田正俊, 池野順一 : SiC のレーザスライシング加工における剥離面性状, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2017) 369.
- 12) 関根大輔, 池野順一, 篠塚信宏, 鈴木秀樹 : 三次元レーザスライシングに関する研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2013) 597.
- 13) 関 紀旺, 庄司克雄, 鈴木浩文, 厨川常元 : ダイヤモンド平バイトを用いた単結晶 Si の延性モード切削, 精密工学会誌, **64**, 9 (1998) 1345.
- 14) 中村格芳, 後藤崇之, 李木経孝 : 単結晶シリコンの超精密加工におけるクラック発生に及ぼす結晶方位の影響, **69**, 12 (2003) 1754.
- 15) 大村悦二, 小川健輔, 熊谷正芳, 中野誠, 福満憲志, 森田英毅 : ステルスダイシングにおける応力拡大係数を用いたき裂進展解析, 日本機械学会論文集(A 編), **76**, 764 (2010) 84.