レーザスライシングによるダイヤモンド成長基板 MgO の薄化技術

山田 洋平^{*1}, 池野 順一^{*1}, 鈴木 秀樹^{*2}, 野口 仁^{*3}

Thinning technology of MgO substrate for diamond growth by laser slicing

Yohei YAMADA^{*1}, Junichi IKENO^{*1}, Hideki SUZUKI^{*2} and Hitoshi NOGUCHI^{*3}^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
255 Shimoookubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan^{*2} Shin-Etsu Polymer Co., Ltd.
1-9 Kandasuda-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0041, Japan^{*3} Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.
2-13-1 Isobe, Annaka-shi, Gunma 379-0127, Japan

Received: 8 January 2021; Revised: 21 February 2021; Accepted: 10 March 2021

Abstract

We tried laser slicing of (100) MgO wafer used as a substrate for heteroepitaxial growth of single crystal diamond. The laser slicing was successful by irradiating the inside of the material with an ultrashort pulse laser and generating a {100} cleavage. However, it was clarified that the cleavage of {100} was excessively extended and deviated from the slicing surface, so that steps of 20 μm were formed on the peeled surface. In order to reduce the kerf-loss, it was necessary to control the cleavage of {100}. Therefore, we proposed a scanning method to control cleavage and its extension. As a result, we succeeded in slicing a 2-inch MgO wafer with a kerf-loss of 30 μm .

Keywords : Laser slicing, MgO, Diamond, Semiconductor, Ultrashort pulse laser

1. 緒 言

単結晶ダイヤモンドは、その優れた材料物性から工業用途で広く用いられている。とくに半導体への応用が期待されており、世界各地で研究がなされている(Umezawa et al., 2012)(Gurbuz et al., 2005)。半導体プロセスでは大面積ウエハが必要であるが、従来のダイヤモンド合成法である高温高压法(Tallaire et al., 2017)やホモエピタキシャル成長(Koizumi et al., 1997)では大面積化が困難である(Chayahara et al., 2010)(Schwander and Partes, 2011)。そこで、格子定数が近い MgO 基板上に、CVD 法によりダイヤモンドをヘテロエピタキシャル成長させる手法が適用されている(Tsubota et al., 2000)。この手法は、大面積化において優位性があるが(澤邊他, 2011)、MgO 基板上に成長したダイヤモンドの剥離が困難であるため、研削加工で厚み 300 μm の MgO 基板を削り取っているのが現状である。もし、MgO とダイヤモンドの剥離が容易になれば、MgO 基板の再生利用が可能で、生産性の向上が期待できる。

その 1 つとして期待されるのが、スマートカット技術である(Bruel et al., 1997)(Pinero et al., 2020)。これは、イオンビームを材料内部に打ち込み、アニーリングやエッチングによってイオン注入層を脆化させることにより結晶材料を剥離させる技術である。しかし、数 μm の厚みで剥離可能な技術であるが、数百 μm 厚の剥離事例はない。加えて、高真空環境が必要であり、加工時間が長いなどの課題が残されている。また、Si, SiC, GaN などの加工例はあるが、MgO の加工事例はなく、現状では適用が難しいと思われる。

一方、MgO のレーザによる内部ダメージの研究は、Sakakura らの報告がある(Sakakura et al., 2015a, 2015b)。超短パルスレーザを MgO 内部に集光させた際の、応力波の伝播とひずみの関係性を観察とシミュレーションによ

り捉えており、結晶材料の内部き裂発生メカニズムを明らかにしているが、加工への応用については述べられていない。

そこで、本研究では MgO 基板を単結晶ダイヤモンドの近傍で剥離させるレーザスライシング技術を検討することにした。レーザスライシング技術とは、レーザを材料内部に集光し、形成された微小な内部加工痕によるへき開や微小なき裂を精密に連結・誘導することで、材料を微小な切り代でスライスする加工技術である(山田他, 2017, 2019, 2020)(阿部他, 2019)。図 1 に示すように、ダイヤモンド膜近傍の MgO 基板内部にレーザを集光させることで、大部分の MgO を剥離させる。スライシング面に残された凹凸や加工ダメージ層を後工程で除去することによって、MgO 基板を再利用することが可能になると考えた。したがって、スライシング面の表面粗さとレーザ照射による加工ダメージ深さの合計が加工ロスとなるため、これらを微小とする精密なレーザスライシング加工を達成することで効率的な再利用が期待できる。

本研究では、MgO のレーザスライシング実現の可能性を調査するため、まず 10 mm 角の(100)MgO ウエハを加工対象とした基礎実験を行い、MgO のレーザスライシング特性を明らかにした。次に、その知見を受けて、2 インチ(100)MgO ウエハのレーザスライシング加工を試みたので報告する。

Fig. 1 Separation diamond wafer from MgO substrate by laser slicing. In this method, appropriate focusing of laser beam can introduce micro cleavages inside MgO substrate, which are connected by series of laser scanning. It can be realized slicing small kerf-loss.

2. MgO のレーザスライシング法の提案と実験方法

2・1 MgO の結晶方位を利用したレーザスライシング法の提案

MgO は図 2 に示すような塩化ナトリウム型の立方晶構造をしており、正六面体の六面を形成する{100}に強いへき開性を持っている(吉岡, 1979)。また、塩化ナトリウム型の結晶は、レーザ内部照射による熱衝撃や形成された加工痕の体積膨張の応力により 3 方向にへき開が伸展することが Sakakura らの研究によって明らかにされている(Sakakura et al., 2015a, 2015b)。したがって、ウエハ面と垂直方向の (010)と(001)のへき開を抑制しつつ、ウエハ面と平行なへき開(100)のみを連結・誘導すれば、微小な切り代で高精度なスライシング加工が実現できると考えた。そこで、基礎実験によってその可能性を明らかにすることを試みた。

2・2 レーザの選定

レーザを材料内部に集光し、加工痕を形成するレーザスライシングは、対象とする材料ごとに適したレーザ波長とパルス幅の選定が必要となる。まず、本研究で対象とする厚み 300 μm の単結晶 MgO ウエハ(100)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。その結果、図 3 に示すように紫外域から近赤外域の広い領域にわたって 80 %以上の透過率を示した。そのため、波長 1030 nm のレーザでも内部に入射可能であることがわかった。次に、集光部で加工しきい値を上回るパワー密度にならなければ加工はできない。そこで、超短パルスレーザならば透過率が高い材料に対しても、極めて高いパワー密度をもつため、局所で加工ダメージに至ると考えた。Sakakura らによれば、MgO に対しフェムト秒レーザで内部加工を行った場合、体積膨張不足により、へき開は形成されないという報告があった(Sakakura et al., 2015a)。そこで、体積膨張を促進するためには、熱的作用が必要だと考えパルス幅の長いピコ秒レーザを選定した。よって、本研究では、波長 1030nm, パルス幅 10ps, 最大出力 4W, 繰り返し発振周波数 10kHz の Light Conversion 社製 PHAROS-4W を用いることにした。

開が連結できるのか確認した。最後に、ラインを複数本形成して面加工を行った際の(100)のへき開の連結状況を評価した。

Fig. 5 Observation of laser mark inside MgO substrate. (010) and (001) cleavages were generated by ultrashort pulse laser irradiation.

Fig. 6 Cross-sectional observation of laser mark. (100) cleavage which is most important to realize slicing (100) MgO substrate was generated.

3・2 光軸方向の加工長さに及ぼすパルスエネルギーの影響

パルスエネルギーを 0.5 μJ から 5.0 μJ まで 0.5 μJ 間隔で変化させた時の加工痕長さを調査した。まず、1.0 μJ , 2.5 μJ , 5.0 μJ におけるウエハ表面からの観察像を図 7(a)に示す。パルスエネルギーが高いほど十字状の{100}に沿ったへき開が長く伸展していることがわかった。次に、断面からの加工痕の観察像を図 7(b)に示す。同様にパルスエネルギーが高いほど光軸方向への伸展が促進されることがわかった。ここで、パルスエネルギーと十字状のへき開長さ及び、光軸方向の加工痕長さの関係を図 8 に示す。十字状のへき開は、2.5 μJ 付近で大きく成長し始める傾向がわかった。このことから、へき開を明確に発生させるために必要な体積膨張量のしきい値がこの付近に存在すると思われる。また、光軸方向の加工痕長さにおいては、1 μJ では 5.3 μm , 2.5 μJ では 16.7 μm , 5 μJ では 30.3 μm となった。3.0 μJ からばらつきが生じ始め、高いパルスエネルギーでは光軸方向の加工痕が急激に伸展する場合があることがわかった。以上のことから光軸方向の加工痕長さを抑制して切り代を小さくするには、低いパルスエネルギーで加工を行うことが好ましいが、へき開を連結させてスライシングを達成するためには、ある程度のパルスエネルギーが必要であることがわかった。ここでは、パルスエネルギーを 2.5 μJ を選定した。

Fig. 7 Influence of pulse energy on laser mark. Increasing pulse energy extends {100} cleavage.

Fig. 8 Relationship between pulse energy and laser mark length of optical axis direction and (001) cleavage length. Laser mark becomes longer as higher pulse energy. Too long laser mark occurs large kerf-loss.

3・3 ウエハ表面と平行に伸展する(100)のへき開に及ぼすドットピッチの影響

ドットピッチを $2\ \mu\text{m}$ から $15\ \mu\text{m}$ まで変化させてレーザ照射実験を行った。パルスエネルギーは $2.5\ \mu\text{J}$ とし、各ドットピッチで1ラインずつ加工した。ウェハ表面からの加工痕観察像を図9に示す。ドットピッチ $2\ \mu\text{m}$ では、加工痕同士がつながり一本の溝が形成されていた。ドットピッチ $4\ \mu\text{m}$ では独立したドットが見られるがドットが大きく成長していることがわかった。どちらも近接してレーザ照射されたため、熱影響による温度上昇によって光吸収係数が上昇したことに起因していると考えられる。ドットピッチを大きくしていくと熱影響が小さくなり、レーザ走査方向と平行にへき開が連結していくことが観察された。ただし、ドットピッチ $15\ \mu\text{m}$ になるとへき開は連結しなくなることがわかった。

この実験による光軸方向の加工痕長さを図10に示す。ドットピッチが小さくなるほど吸収係数の上昇によって加工痕が光軸方向に成長し、ばらつきが大きくなることがわかった。また、ドットピッチ $7\ \mu\text{m}$ 以上では加工痕の光軸方向への成長が飽和し $16\ \mu\text{m}$ 程度で一定になることがわかった。したがって、光軸方向の加工痕長さを抑制して切り代の小さいスライシング加工を達成するためには、パルスエネルギー $2.5\ \mu\text{J}$ の時、ドットピッチは $7\ \mu\text{m}$ を選定するのが良いと思われた。

Fig. 9 Relationship between pulse energy and dot pitch. Decreasing dot pitch, laser marks are connected to each other by cleavage. However, laser marks grow excessively by heat affection in too narrow dot pitch conditions.

Fig. 10 Relationship between dot pitch and laser mark length. Increasing dot pitch saturates laser mark length.

3・4 ウエハ表面と平行に伸展する(100)のへき開に及ぼすラインピッチの影響

ドットピッチの知見より、へき開のみで連結させていくためには、ラインピッチも $7\ \mu\text{m}$ 付近に設定し、加工痕を整列させマス目状に連結させていくのが良いと考えられた。そこで、念のためラインピッチを $2\ \mu\text{m}$ から $8\ \mu\text{m}$ まで変化させレーザ照射実験を行った。パルスエネルギーは $2.5\ \mu\text{J}$ 、ドットピッチは $7\ \mu\text{m}$ とし、それぞれのラインピッチで20本ずつラインを加工した。ウェハ表面からの観察結果を図11に示す。ラインピッチが小さい条件ではドットピッチと同様に熱影響が大きくなり、加工痕同士がつながっていくことがわかった。ラインピッチ $7\ \mu\text{m}$ では、へき開がライン間で連結しマス目状に形成されているように観察された。一方、ラインピッチ $8\ \mu\text{m}$ では、ラインピッチ方向のへき開が途切れることがわかった。

そこで、ラインピッチ $7\ \mu\text{m}$ で $10\ \text{mm}$ 角の MgO ウエハに対し全面加工を行い、剥離の可否を調査した。その結果、レーザ照射によって透明性を維持した均一な加工面が観察され、へき開が全面マス目状に連結しているようであったが、剥離はしなかった。これは、へき開の連結が不十分であったと考えられる。そこで、ラインピッチを小さくし、 $5\ \mu\text{m}$ として加工を行うことにした。加工ラインを20本、30本、40本と形成した。その結果を図12に示す。これより、40本形成した時点で(100)に沿ったへき開が加工部を超えて $300\ \mu\text{m}$ ほど大きく伸展する現象が観察された。これは、加工ラインを順次、ウェハ表面と平行に形成していくと、体積膨張による応力が材料内部に薄く面状に蓄積していく。このくさびを打ち込むような作用で(100)のへき開が押し広げられ一気に伸展したためと考えられる。ただし、この現象を利用すれば、ウェハ面と平行な(100)のへき開を効率よく伸展させることができ、剥離が可能になるのではないかと考えた。

Fig. 11 Influence of line pitch on linkage of laser mark. At the line pitch 7 μm , cleavages were connected to each other uniformly. However, it was not able to peel off.

Fig. 12 A sudden extension of (100) cleavage in narrow line pitch conditions less than 5 μm . It is considered that the stress due to volume expansion was accumulated and acted like a wedge.

4. くさびの作用を利用した剥離の試み

4・1 剥離実験

加工条件はパルスエネルギー 2.5 μJ , ドットピッチ 7 μm とし, ラインピッチを(100)のへき開が大きく伸展した 5 μm で, 10 mm 角ウエハの全面加工を行い, 剥離を試みた.

レーザ照射した剥離前の MgO 試料の観察像を図 13 に示す. これまでの基礎実験では見られなかった白濁した不均一な模様が観察された. この全面加工した試料をウエハ面に対し垂直方向に引張り, 剥離を試みた. その結果, 3.91 MPa の引張応力で全面剥離に成功した. 剥離後のウエハを図 14 に示す. 剥離前に見られた模様と同一のものが剥離面に観察され, 段差が形成されていることがわかった. その影響で, 表面粗さは上面側で 20.975 μmSz , 下面側で 20.497 μmSz と大きなものとなった. また, 剥離面の上下面を比較すると, 白濁した箇所は上面のみに見られ, 下面はほぼ透明であった.

Fig. 13 Laser slicing applying wedge effect at the line pitch of 5 μm before peeling. Cloudy areas were generated non-uniformly.

Fig. 14 Laser slicing applying wedge effect at the line pitch of 5 μm after peeling. Steps were generated at the cloudy area.

4・2 剥離面形成メカニズムと対策

剥離面に段差が生じた原因を探るべく、白濁部の観察を行った。図 14 中の A と A' で示した箇所を拡大図を図 15 に示す。上面側の白濁部では、 $\Phi 2 \mu\text{m}$ の大きな穴が形成されており、この加工穴によって光が散乱して白濁して見えることがわかった。表面粗さは $3.115 \mu\text{mSz}$ であった。一方で下面側の同一箇所では、穴ではなくクレータ状の窪みが形成されており、周囲には円弧状の溶融飛散物が観察された。表面粗さは $1.201 \mu\text{mSz}$ となっていた。次に、透明部 B の観察結果を図 16 に示す。上下面ともに非常に滑らかな面で形成されており、加工穴は観察されなかった。表面粗さは、 $0.089 \mu\text{mSz}$ と鏡面であった。白濁部と透明部の境界付近のプロファイルを計測してみると、図 17 に示すような $20 \mu\text{m}$ ほどの垂直な段差が形成されており、透明部は加工痕とは関係ない箇所、引張力を負荷した際にへき開が生じて剥離した部分であることがわかった。

以上の結果から剥離メカニズムは次のように考えられる。くさびの作用によって伸展したへき開上にレーザが照射されると、屈折率の違いでへき開の上面側で反射する。そのため、界面で光は強め合い上面側で加工穴を形成し白濁する。一方、下面側では、上面側の穴加工で発生したプラズマが吹き出すため、下面側にクレータが形成されたと考えられる。この現象による圧力によって、(100)のへき開が更に押し広げられ伸展していくと考えられる。剥離時には、(010)、(001)といったウェハ表面と垂直方向のへき開が生じ、スライシング面を外れた箇所、剥離し、垂直な段差が形成されたと考えられる。

したがって、くさびの作用によって、へき開を一方に大きく伸展させスライシングする手法では、剥離は容易であるが、へき開の制御が困難となるため、剥離面に段差が発生し、微小な切り代でのスライシング加工を達成できない。切り代を小さくするには、制御可能な小規模なへき開を生じさせ、順にそれら加工痕間のみで連結し、大きな段差を生じさせないような工夫が必要であることがわかった。

Fig. 15 Cloudy area after peeling. Large holes were generated on the top peeled face. On the other hand, Crater were generated on the bottom peeled surface.

Fig. 16 Clear area after peeling. Laser marks were not observed.

Fig. 17 Peeled surface profile shape at the boundary between cloudy area and clear area. Cleavages of (010) were excessively extended and deviated from the slicing surface, so that step of $20 \mu\text{m}$ was generated on the peeled surface.

5. ヘキ開伸展制御法の提案と2インチウエハスライシング加工

5・1 ヘキ開伸展制御による剥離実験と加工ダメージ評価

図18に示すようなヘキ開伸展制御法を考案した。加工を2工程に分け、1工程目ではくさびの作用でヘキ開が先に伸展しないように大きいラインピッチで加工し、(100)でのヘキ開をライン周辺の狭い領域に留める。2工程目では1工程目のライン間にレーザを照射する。この時、ライン周辺に存在するヘキ開端部にレーザを照射することで、図15に示したヘキ開上でのプラズマ発生によりヘキ開を拡げ、ライン間で徐々にヘキ開を連結させることを考えた。これにより、大きな段差の生じない高精度なスライシングが達成できると考えた。

提案手法の有効性を確かめるために、10 mm 角の全面加工を行って剥離を試みた。加工条件は、1工程目は、図11で示した、ヘキ開が完全に連結していない条件であるラインピッチ $8\text{ }\mu\text{m}$ とし、2工程目の加工ラインをちょうどその中間になるように加工した。したがって、実質的なラインピッチは $4\text{ }\mu\text{m}$ となる。パルスエネルギーは $2.5\text{ }\mu\text{J}$ 、ドットピッチは $7\text{ }\mu\text{m}$ でこれまでと同様とした。剥離前の観察像を図19(a)に示す。全面薄曇り状態であり、不均一な模様は見られなかった。この試料を引張試験機によって剥離をしたところ、 1.59 MPa の応力で全面剥離に成功した。剥離後の外観を図19(b)に示す。表面粗さは上面側で $7.678\text{ }\mu\text{mSz}$ 、下面側で $4.919\text{ }\mu\text{mSz}$ と大きく改善しており、図20に示す上面側の剥離面プロファイルからわかるように図17で示したような大きな段差はなかった。次に、上下剥離面の詳細観察の結果を図21に示す。1工程目と2工程目で加工痕の様相が明らかに異なっており、2工程目のヘキ開上でのレーザ吸収現象による効果が顕著に表れ、期待通りの加工が達成できた。

続いて、剥離面の加工ダメージ深さを評価するために、10 mm 角ウエハの中央部を割断し、イオンミリングによって研磨後、SEMによる断面観察を行った。最大の光軸方向の加工痕長さが観察された箇所を図22に示す。図22(a)の1パス目に形成された穴の直径は $\Phi 0.9\text{ }\mu\text{m}$ ほどであり、光軸方向の加工痕長さは最大で $6.6\text{ }\mu\text{m}$ だった。次に図22(b)に示す2工程目の大きな穴は、直径 $\Phi 2.8\text{ }\mu\text{m}$ 程度であり、光軸方向の加工痕長さは最大で $8.6\text{ }\mu\text{m}$ であった。したがって、本提案手法の加工ダメージ深さは $8.6\text{ }\mu\text{m}$ であり、切り代を微小でスライスするという目的に対して、有効であることが示された。

Fig. 18 Proposal of cleavage control technique. On the 1st process, (100) cleavage is generated slightly by wide line pitch. On the 2nd process, (100) cleavage is connected to each other by laser irradiation on the cleavage which was generated at the 1st process.

Fig. 19 Appearance of laser slicing apply proposal technique before and after peeling. It was able to generate (100) cleavage uniformly.

Fig. 20 Peeled surface profile applying proposal technique. It was able to peel off without (010) and (001) steps.

Fig. 21 SEM observation of peeled surface applying proposal technique. Small holes on the 1st process and large holes on the 1st process were generated as expected.

Fig. 22 Evaluation of process damage. Maximum damage thickness was 8.6 µm.

5・2 2インチ MgO ウエハのレーザスライシング加工

大面積化の実現可能性を調査するために、提案手法を用いて2インチウエハのスライシング加工を試みた。加工条件は4.1節と同様である。その結果2インチ MgO のスライシング加工に成功した。剥離応力は3.08 MPaであった。剥離後の外観を図23に示す。10 mm 角全面加工と同様な均一な剥離面をしており、図24に示すように、上面側の剥離面中央部分の形状プロファイルを見ても大きな段差のない良好な面であった。下面側の表面粗さは5.086 µmSz。大きな加工穴が形成されている上面側の表面粗さは8.515 µmSz となった。10 mm 角での剥離と比較して悪化した原因は、2インチウエハのエッジ部に面取りが施されていたことが影響していると考えられる。面取り部にレーザが集光されると表面でアブレーションが発生し、材料内部での加工痕形成が不安定となる傾向があった。そのため、へき開の伸展・連結が他とは異なり微小な段差が形成され、悪化したと考えられる。今後は、エッジ部付近は加工条件を変更するなどの工夫が必要であると考えられる。

本論文で目的とする図1で示したようなダイヤモンド成長後の MgO 基板の剥離を考えると、再利用する MgO 基板表面は、本論文で言うところの上面側である。上面側の表面凹凸 (8.515 µmSz) と加工ダメージ深さ (8.6 µm) を後工程の研削で除去し、その後、エッチング、研磨を行うと考えると、合計で30 µm ほど除去すれば再利用が可能となる。したがって、300 µm 厚の MgO 基板を複数回再利用することが可能になるため、ヘテロエピタキシャル成長によるダイヤモンド合成において、生産性向上に効果的であると言える。

Fig. 23 Laser slicing of 2 inch (100) MgO wafer.

Fig. 24 Measurement of peeled surface profile shape of 2 inch MgO wafer. Maximum surface roughness was 8.515 μmRz . We realized high quality slicing.

6. 結 言

ヘテロエピタキシャル成長によるダイヤモンド合成における, MgO 成長基板とダイヤモンドの剥離技術として, レーザスライシング技術の適用を図った. 本論文では(100)MgO ウエハのスライシング加工の基礎的検討を行った結果, 以下の知見が得られた.

- (1) MgO 内部にピコ秒レーザを照射することにより, 局所的な温度上昇により縦長の穴が形成される. この体積膨張と衝撃によって{100}に沿ったへき開が形成される.
- (2) レーザの照射間隔を大きくし, {100}のへき開を微小に連結することにより, 加工ダメージの小さい加工が可能になると考えられるが, へき開の連結が弱く, 剥離は困難である.
- (3) レーザの照射間隔を小さくし, ラインを複数本形成していくと, くさびの作用により, (100)のへき開が大きく伸展する. このへき開によって剥離は容易になるが, へき開を制御することが困難なため, スライシング面外方向に伸展し, 剥離面には大きな段差が形成される.
- (4) 微小にへき開を伸展させる工程と, そのへき開上にレーザを照射し, へき開を拡張させる工程の 2 工程に分けて加工することで, へき開の伸展を制御し, 切り代が微小なスライシング加工を実現した.
- (5) 2 インチ MgO ウエハの高品位な剥離に成功した. 後工程を含めて 30 μm の材料ロスで MgO を繰り返し再利用できることが明らかになった.

文 献

- 阿部達毅, 山田洋平, 池野順一, 鈴木秀樹, 3 次元レーザスライシングによるガラス光学素子の作製, 精密工学会誌, Vol. 85, No. 5 (2019), pp. 426-431.
- Bruel, M. and Bernard Herve, B. A., Smart-cut: a new silicon on insulator material technology based on hydrogen implantation and wafer bonding, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 36 (1997), pp. 1636-1641.
- Chayahara, A., Mokuno, Y., Mokuno, Tsubouchi, N. and Yamada, H., Development of single-crystalline diamond wafers, Synthesiology, Vol. 3, No. 4 (2010), pp. 272-280.
- Gurbuz, Y., Esame, O., Tekin, I., Kang, W. P. and Davidson, J. L., Diamond semiconductor technology for RF device applications, Solid-State Electronics, Vol. 49, Issue 7 (2005), pp. 1055-1070.
- Koizumi, S., Kamo, M. and Sato, Y., Growth and characterization of phosphorous doped {111} homoepitaxial diamond thin films, Applied Physics Letters, Vol. 71 (1997), 1065.
- Pinero, J. C., Vecchy, J., Fernandez, D., Alba, G., Widies, J., Cioccio, L., Lloret, F., Araujo, D. and Pernot, J., Lattice performance during initial steps of the Smart-Cut process in semiconducting diamond: A STEM study, Applied Surface Science, Vol. 528 (2020), 146998.

- Sakakura, M., Shimotsuma, Y., Fukuda, N. and Miura, K., Transient strain distributions during femtosecond laser- induced deformation inside LiF and MgO single crystals, *Journal of Applied Physics*, Vol. 118, No. 2 (2015a), 023106.
- Sakakura, M., Okada, T., Shimotsuma, Y., Fukuda, N. and Miura, K., Fast and slow dynamics in femtosecond laser-induced crack propagation inside a LiF single crystal, *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*, Vol. 10, No. 3 (2015b), pp. 320-324.
- 澤邊 厚仁, 児玉 英之, 鷺山 瞬, 日高 正洋, 阿部 諭, 市原 幸雄, 古滝 敏郎, 小山 浩司, 大山 幸希, 石垣 哲孝, 王 宏興, 武藤 勝彦, 河野 省三, ヘテロエピタキシャルダイヤモンド基板の開発とそのデバイス応用, 表面技術, Vol. 62, No. 3 (2011), pp. 163-169.
- Schwander, M. and Partes, K., A review of diamond synthesis by CVD processes, *Diamond and Related Materials*, Vol. 20, Issue 9 (2011), pp. 1287-1301.
- Tallaire, A., Mille, V., Brinza, O., Thi, N. T., Brom, J. M., Loguinov, Y., Katrusha, A., Koliadin, A. and Achard, J., Thick CVD diamond films grown on high-quality type IIa HPHT diamond substrates from New Diamond Technology, *Diamond and Related Materials*, Vol. 77 (2017), pp. 146-152.
- Tsubota, T., Ohta, M., Kusakabe, K., Morooka, S., Watanabe, M. and Maeda, H., Heteroepitaxial growth of diamond on an iridium (100) substrate using microwave plasma-assisted chemical vapor deposition, *Diamond and Related Materials*, Vol. 9, Issue 7 (2000), pp. 1380-1387.
- Umezawa, H., Nagase, M., Kato, Y. and Shikata, S., High temperature application of diamond power device, *Diamond and Related Materials*, Vol. 24 (2012), pp. 201-205.
- 山田洋平, 池田知陽, 池野順一, SiC の精密レーザスライシング 第1報: カーブロスを考慮したスライシング法の検討, 砥粒加工学会誌, Vol. 64, No. 12 (2020), pp. 635-642.
- 山田洋平, 池野順一, 鈴木秀樹, 単結晶シリコンの精密レーザスライシング技術, 精密工学会誌, Vol. 85, No. 5 (2019), pp. 419-425.
- 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, Vol. 83, No. 4 (2017), pp. 375-380.
- 吉岡正人, MgO 単結晶における圧痕および塑性領域の形成過程, 精密工学会誌, Vol. 45, No.535 (1979), pp. 820-825.

References

- Abe, T., Yamada, Y., Ikeno, J. and Suzuki, H., Production of glass optical devices by three-dimensional laser slicing, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 85, No. 5 (2019), pp. 426-431 (in Japanese).
- Bruehl, M. and Bernard Herve, B. A., Smart-cut: a new silicon on insulator material technology based on hydrogen implantation and wafer bonding, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36 (1997), pp. 1636-1641.
- Chayahara, A., Mokuno, Y., Mokuno, Tsubouchi, N. and Yamada, H., Development of single-crystalline diamond wafers, *Synthesiology*, Vol. 3, No. 4 (2010), pp. 272-280.
- Gurbuz, Y., Esame, O., Tekin, I., Kang, W. P. and Davidson, L. J., Diamond semiconductor technology for RF device applications, *Solid-State Electronics*, Vol. 49, Issue 7 (2005), pp. 1055-1070.
- Koizumi, S., Kamo, M. and Sato, Y., Growth and characterization of phosphorous doped {111} homoepitaxial diamond thin films, *Applied Physics Letters*, Vol. 71 (1997), 1065.
- Pinero, J. C., Vecchy, J., Fernandez, D., Alba, G., Widies, J., Cioccio, L., Lloret, F., Araujo, D. and Pernot, J., Lattice performance during initial steps of the Smart-Cut process in semiconducting diamond: A STEM study, *Applied Surface Science*, Vol. 528 (2020), 146998.
- Sakakura, M., Shimotsuma, Y., Fukuda, N. and Miura, K., Transient strain distributions during femtosecond laser- induced deformation inside LiF and MgO single crystals, *Journal of Applied Physics*, Vol. 118, No. 2 (2015a), 023106.
- Sakakura, M., Okada, T., Shimotsuma, Y., Fukuda, N. and Miura, K., Fast and slow dynamics in femtosecond laser-induced crack propagation inside a LiF single crystal, *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*, Vol. 10, No. 3 (2015b), pp. 320-324.
- Sawabe, A., Kodama, H., Washiyama, S., Hitaka, M., Abe, S., Ichihara, Y., Kotaki, T., Koyama, K., Oyama, K., Ishigaki, N., Wang, X., H., Mutoh, K. and Kono, S., Development of hetero-epitaxial diamond substrate and its device application, *Journal of The Surface Finishing Society of Japan*, Vol. 62, No. 3 (2011), pp. 163-169(in Japanese).
- Schwander, M. and Partes, K., A review of diamond synthesis by CVD processes, *Diamond and Related Materials*, Vol. 20, Issue 9 (2011), pp. 1287-1301.

- Tallaire, A., Mille, V., Brinza, O., Thi, N. T., Brom, J. M., Loguinov, Y., Katrusha, A., Koliadin, A. and Achard, J., Thick CVD diamond films grown on high-quality type IIa HPHT diamond substrates from New Diamond Technology, *Diamond and Related Materials*, Vol. 77 (2017), pp. 146-152.
- Tsubota, T., Ohta, M., Kusakabe, K., Morooka, S., Watanabe, M. and Maeda, H., Heteroepitaxial growth of diamond on an iridium (100) substrate using microwave plasma-assisted chemical vapor deposition, *Diamond and Related Materials*, Vol. 9, Issue 7 (2000), pp. 1380-1387.
- Umezawa, H., Nagase, M., Kato, Y. and Shikata, S., High temperature application of diamond power device, *Diamond and Related Materials*, Vol. 24 (2012), pp. 201-205.
- Yamada, Y., Ikeda, T. and Ikeno, J., Precision laser slicing technology for single crystal SiC wafer 1st report : Study on slicing method considering kerf-loss, *Journal of the Japan Society of Grinding Engineers*, Vol. 64, No. 12 (2020), pp. 635-642 (in Japanese).
- Yamada, Y., Ikeno, J. and Suzuki, H., Precision slicing of single crystal silicon using laser slicing technology, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 85, No. 5 (2019), pp. 419-425 (in Japanese).
- Yamada, Y., Kaneko, Y., Aoki, R., Ikeno, J. and Suzuki, H., Laser cutting out process for semiconductor crystal material applying laser slicing method, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 83, No. 4 (2017), pp. 375-380 (in Japanese).
- Yoshioka, M., Crack formation process during indentation of scratching on the surface of MgO single crystals, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 45, No.535 (1979), pp. 820-825 (in Japanese).