

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17991

研究課題名(和文) レーザスライシング技術による難加工性硬脆材料の超精密三次元加工

研究課題名(英文) Hard and brittle materials 3D ultra-precision machining using laser slicing technology

研究代表者

山田 洋平 (YAMADA, Yohei)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60756899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：半導体材料の高精度三次元切断技術としてレーザスライシング技術を開発した。レーザスライシング技術とはレーザを材料内部に集光させ、微小加工痕を形成し、加工痕を一つ一つ精密に連結させていくことにより高精度かつ三次元加工を実現する技術である。本研究では、Siウエハに対し種々の加工条件による微小加工痕形状制御を行った。出力・加工痕間隔・収差補正をすることにより、加工痕を数 $\mu\text{m}$ 以下まで微小化することが可能になり、その結果、結晶材料切断加工において最も課題となる結晶方位に依存しない高精度な切断加工を実現した。また、次世代パワー半導体として注目されているSiCにも本加工技術を適用し、同様に切断を実現した。

研究成果の概要(英文)：We proposed laser slicing technology for semiconductor materials cutting. In this technology, micro crack is created inside of the material by focusing pulse laser beam on the inside. Then, each micro crack link by scanning pulse laser. As the result, high-precision and low waste cutting process was realized. In this research, we investigated the shape of micro cracks control by controlling laser energy, clearance of the micro cracks and aberration correction. We found that influence of crystal orientation can be ignored by refinement micro cracks. Therefore, we realized high-precision and high quality cutting for semiconductor materials.

研究分野：レーザ加工

キーワード：レーザスライシング 半導体 Si SiC 切断加工

### 1. 研究開始当初の背景

半導体産業は、高度に情報化が進んだ現代社会においては基幹産業の一つであり、半導体デバイスの高性能化が人類の発展に直結している。半導体デバイスは微細化することにより高性能化、低コスト化が進むことから、それを実現する生産加工技術の発展が重要であり、世界中で研究開発が盛んに行われている。半導体材料の代表的な微細加工技術としてエッチング、切削加工が挙げられるが、エッチングは、化学成分が環境に影響を与える、加工速度が遅い、形状に制限がある。一方、切削加工は、半導体材料の硬さに起因した工具摩耗。脆性に起因した不必要なクラックの伸展により加工精度が低いなどの課題を抱えている。

このように、半導体微細加工技術の転換が求められており、近年レーザー加工に注目が集まっている。レーザー加工は、加工ツールが光であるため、従来の加工法と異なり非接触加工である。そのため、加工力が非常に小さい。そして、数 100 nm 程度の極小領域に高エネルギー密度のレーザーを集光することが可能であるため、機械加工で大きな問題となる材料の硬さの影響を受けずに加工できる。熱影響部が小さいなどの優れたメリットがあるため硬脆材料の微細加工に適している。従来レーザー加工は、加工能率が低く、設備コストが高いためその用途に限りがあったが、近年、高出力化や様々な種類のレーザー発振器、加工法の新規開発に伴い、分野を問わず応用例が拡大している。しかし、レーザー微細加工は、デブリ（加工面に付着した溶融物）による加工精度、面品位の悪化。熱影響部による品質低下。2. 5次元加工であるため複雑三次元形状の加工が困難といったことが挙げられ、更なる微細加工の実現を阻害している。

### 2. 研究の目的

本研究では上述したレーザー加工の課題を一挙に解決可能な加工技術の開発を目指し、レーザースライシング技術に着目した。レーザースライシング技術とは、図 1 に示すようにレーザーの透過性を利用し、材料内部にレーザー光を集光する。集光点では熱により材料の変質が発生し、微小加工痕が形成される。この微小加工痕をパルスレーザーを走査させることにより、1点1点連鎖させ

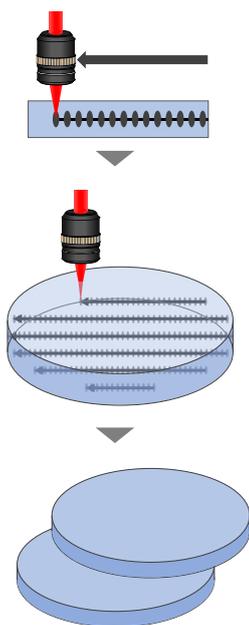


図 1 レーザスライシング技術

材料を内部から加工する技術である。本加工技術により、これまでのレーザー加工では実現できなかった正確な深さ方向の制御が可能になり、複雑な三次元加工を可能にできると考えられる。また、微小加工痕は数  $\mu\text{m}$  オーダーであるため切り代が非常に小さく材料ロスを抑制することが可能であると考えられる。

これまでの研究においてサファイヤや Si ウエハなどに対して、厚み数百  $\mu\text{m}$  のウエハを二分するスライシング加工や、円形にウエハを切り抜く加工などを実現してきた。しかし、加工条件と切断精度・加工面性状の関係性、結晶方位の影響など加工メカニズムに関する点において不明な点が多く存在し、加工技術としては未熟であった。そこで本研究では、さらなるレーザースライシング技術の高精度化高品位化のために、加工メカニズムの解明。特に微小加工痕形状の制御に主眼をおいて研究を行った。また、近年、次世代パワー半導体として注目されている SiC に対しても加工を試み、加工の実現可能性。加工特性を調査した。

### 3. 研究の方法

Si ウエハに対し図 2 に示すような切り抜き切断を行った場合、図 3 のように加工断面において性状にバラツキが存在する。このバラツキは微小加工痕同士の連鎖によるものと、結晶方位に沿ったへき開が混在しているためである。これを抑制するためには、微小加工痕を一つ一つを均一に形成し、連鎖させる必要があると考えられ、レーザーパルスエネルギー、微小加工痕間隔といった代表的なパラメータによる加工痕形状への影響を調査した。

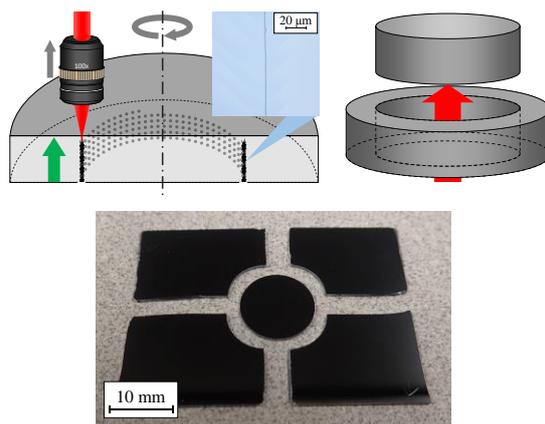


図 2 レーザ切り抜き加工

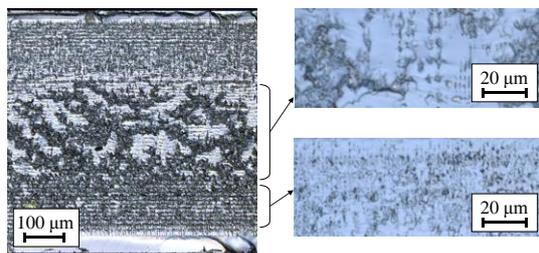


図 3 レーザ切り抜き加工による加工断面

#### 4. 研究成果

##### ① レーザパルスエネルギーの影響

パルスエネルギーを変化させた際の加工痕位置と加工痕長さの関係を図4に示す。加工痕位置は微小内部加工痕の中心点を測定し、シリコン表面からの距離を示している。シリコンの屈折率の影響により、設定スポット位置に対し加工痕位置は約4倍深い位置に形成されており、パルスエネルギーを高くすると2  $\mu\text{J}$  で7  $\mu\text{m}$ 、8  $\mu\text{J}$  で15  $\mu\text{m}$  と加工痕長さは長くなり、より深い位置でも微小内部加工痕を形成可能であることがわかった。また、加工痕長さはパルスエネルギーに対し飽和する傾向がある。これは、熱拡散による多結晶化領域の形成に原因があると考えられる。微小加工痕はレーザの熱により多結晶化し、その周囲に残留応力が働くため形成されると考えられる。つまり、加工痕長さは多結晶化領域の長さに対応すると考えられる。熱拡散は半径に反比例するため、今回のパルスエネルギーの範囲では多結晶化領域の変化が少なかったため飽和したと考えられる。次に、図5に示すように8  $\mu\text{J}$  の条件では、加工痕位置が浅い22  $\mu\text{m}$  では加工痕長さ15  $\mu\text{m}$ 。加工痕位置が深い354  $\mu\text{m}$  では加工痕長さ6  $\mu\text{m}$  となり加工痕位置が深くなるにつれ加工痕長さは短くなった。これは、シリコンへの吸収による光強度の減衰が原因と考えられる。

以上の実験より、内部加工痕の微小化のためには、加工位置毎に加工痕が形成される必要最低限のパルスエネルギーを設定して加工する必要のあることがわかり、パルスエネルギーによって加工痕長さを制御可能であることがわかった。

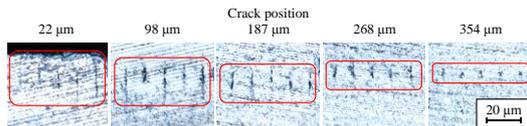


図4 パルスエネルギーによる加工痕形状の変化

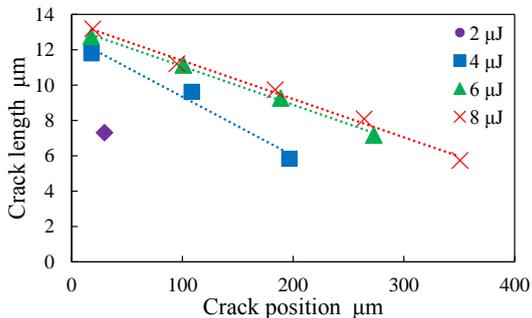


図5 パルスエネルギーによる加工痕形状の変化

##### ② 微小加工痕間隔の影響

次に隣り合う微小内部加工痕の間隔（クラックピッチ・レーザの照射スポット間隔）と加工痕長さの関係を調査した。設定スポット位置を一定とし表面から約80  $\mu\text{m}$  地点に前節と同様の方法で加工痕を形成し、10ラインの加工を行った。レーザのパルスエネルギーは3  $\mu\text{J}$  とした。各条件における加工痕長さを図

6に示す。クラックピッチ5  $\mu\text{m}$  の条件では加工痕長さが6  $\mu\text{m}$ 。クラックピッチ0.5  $\mu\text{m}$  の条件では加工痕長さが22  $\mu\text{m}$  とクラックピッチを狭くするほど加工痕長さが長くなることわかった。これは、加工痕が先に照射されるレーザの影響を受けていることを示しており、熱衝撃による加工痕の成長、残留した熱、シリコンの多結晶化による光吸収係数上昇の影響であると考えられる<sup>9)</sup>。

また、赤外線透過顕微鏡による加工痕の観察結果を図7に示す。図中(a)のクラックピッチ0.5  $\mu\text{m}$  では完全に加工痕同士がつながっており加工ラインの幅が太く形成された。また、図中(b)の2  $\mu\text{m}$  付近を超えると加工ライン幅が小さくなり加工痕同士が独立し始め、図中(c)のようにクラックピッチが大きくなるにつれ加工痕が完全に独立していくことがわかった。本手法では、微小内部加工痕の大きさを微小化しつつも確実に加工痕同士を繋げることが重要であるため、クラックピッチ2  $\mu\text{m}$  付近での条件が最適であると考えた。

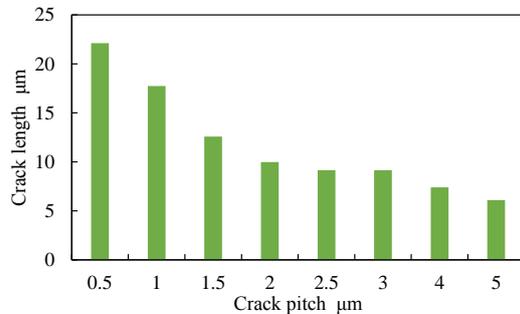


図6 加工痕間隔による加工痕長さの変化

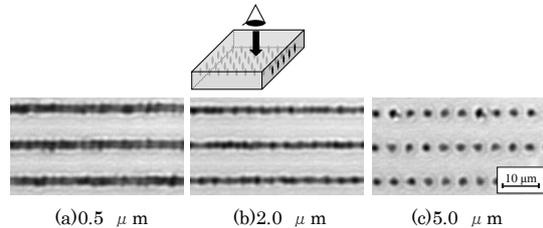


図7 加工痕間隔による加工痕連鎖状況

##### ③ 結晶方位の影響

次に結晶方位の影響を調べるために、同一収差補正環量における結晶面{100}、{110}の加工痕観察像を図8に示す。深い位置に行くにしたがい加工痕長が短くなっていく傾向は明らかであるが、{110}の設定スポット位置-10  $\mu\text{m}$  においては直線的な加工痕から斜めに伸びる加工痕が顕著に観察でき、隣り合うラインと連結していることがわかった。シリコンは<111>、<110>、<100>方向の順にへき開しやすいことが知られている。そのため、{110}で形成された加工痕は最もへき開しやすい<111>方向に沿って斜めの加工痕が伸展したと考えられる。

以上の結果より、図4に示した加工断面において大きくへき開している箇所は、この結晶方位に沿った斜めの加工痕から伸展したも

のであると考えられる。しかし、加工痕長さが小さくなるにつれ斜めの加工痕はなくなり、設定スポット位置-50  $\mu\text{m}$  の条件では結晶方位の影響を受けず加工痕はほぼ点となることがわかった。加工痕長さが 7  $\mu\text{m}$  以下ならばどの加工条件、結晶面においても斜めに伸展した加工痕がなくなることがわかった。

本条件にて Si の円形切り抜きを行った際の加工断面を図 9 に示す。図 4 で示した加工断面と比較して均一な加工面になっており、{100}、{110}からの観察においても大きな差はなく均一である。よって、へき開のない高品位な加工断面を達成するためには、加工痕長さを 7  $\mu\text{m}$  以下に制御すればよいことがわかった。

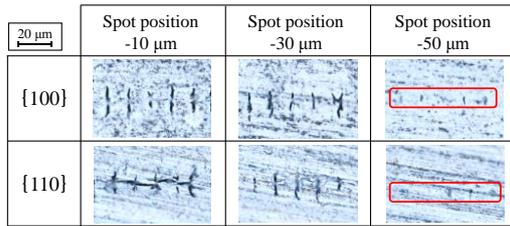
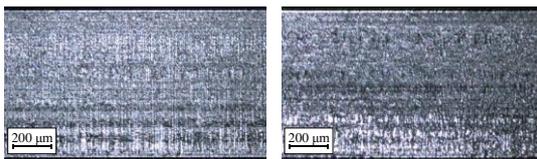


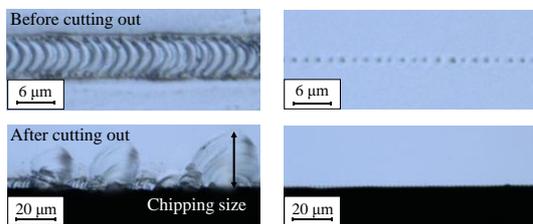
図 8 結晶方位による加工痕形状への影響



(a) {100} (b) {110}  
図 9 加工痕形状制御による加工断面均一化

#### ④ 熱影響

Si 切り抜きにおける最表面への熱影響を調査した。図 10 に示すように従来法によるレーザー切断では、最表面では熔融痕が見られるが、本手法では小さなドット（加工痕）しか見られず熱影響がないことがわかる。この影響は切り抜き後のエッジ部のチップングとして顕著に効果が見られ、本手法においてはドット同士が連鎖しほぼチップングが見られない高精度な切断加工を実現した。



(a) 従来法でのレーザー切断 (b) レーザ切り抜き加工

図 10 再表面での熱影響

#### ⑤ SiC のレーザスライシング加工

他材料への適用を図るべく、SiC に対してレーザスライシング加工を試みた。SiC における加工痕形状を図 11 に示す。Si とは異なり三角形の加工変質部が形成されその下にき裂が入ることが確認できた。これをラ

イン状に形成し複数本形成すると図 12 のように黒い変質部で形成されたライン間を連結するようにへき開が進展することが確認できた。これを 10 mm 角の基板全面に形成することにより、剥離に成功した（図 13 参照）

剥離面には周期的な凹凸が形成され、梨形状であった Si とは異なる剥離面性状である。これは SiC の結晶構造によるものだと考えられ今後研究を進めていく。

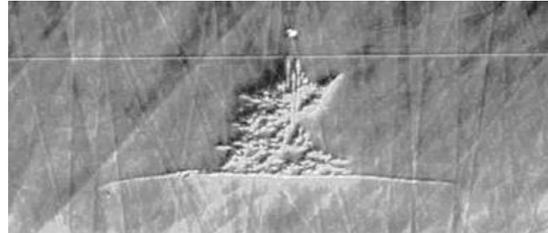


図 11 SiC の加工痕形状

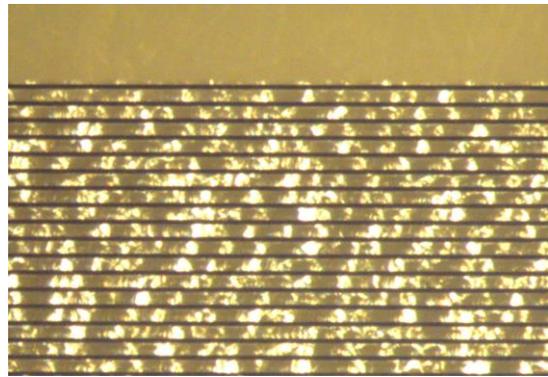


図 12 剥離前の SiC 透過画像

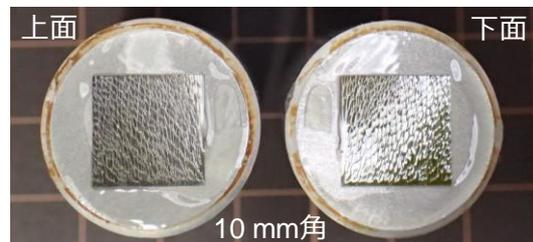


図 13 剥離後の SiC 加工断面

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) 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き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、査読有、Vol.83, 2017, 611-616  
DOI:<https://doi.org/10.2493/jjspe.83.375>

[学会発表] (計 3 件)

- 1) Yohei Yamada and Junichi Ikeno, Laser Cutting Out Process for Semiconductor Substrates Applying Laser Slicing Method,

32<sup>nd</sup> ASPE Annual Meeting, 2017

- 2) 山田洋平、金子洋平、阿部達毅、池野順一、  
レーザーライシニング技術による単結晶 Si  
の高品位高速スライス加工、2016 年度精  
密工学会秋季大会学術講演会、2016
- 3) 山田洋平、金子洋平、青木陸、池野順一、  
レーザーライシニング技術を応用したレー  
ザ切り抜き加工、2016 年度砥粒加工学会  
学術講演会、2016

[その他]

ホームページ等

<http://spe.mech.saitama-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山田 洋平 (YAMADA, Yohei)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：60756899