

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05081

研究課題名(和文) 半導体ウエハの新規スライス加工技術の開発

研究課題名(英文) Development of novel processing method for slicing of semiconductor wafer

研究代表者

甲藤 正人 (Katto, Masahito)

宮崎大学・産学・地域連携センター・准教授

研究者番号：80268466

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：波長 800 nm の超短パルスレーザーであるチタンサファイアレーザーを、パルスエネルギーならびに照射回数を変えて、Si 単結晶基板表面に集光して照射し、アモルファス変成誘起や加工の様子を観測する実験を行った。この結果、表面の面方位により加工の進展が異なることや、アモルファス変成からアブレーションへと進展する過程が、パルスエネルギーにより異なることなど、加工の初期過程に関する知見が得られた。また、アモルファス変成部のみがアブレーションへと進展している条件も得られ、選択的な加工が可能であることが示された。さらに、Si 基板表面にアモルファスのパターンを描画することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波長 800 nm の超短パルスチタンサファイアレーザーを、パルスエネルギーならびに照射回数を変えて、Si 単結晶基板表面に集光して照射し、アモルファス変成誘起や加工の様子を観測する実験を行った。この結果、表面の面方位により加工の進展が異なることや、アモルファス変成からアブレーションへと進展する過程が、パルスエネルギーにより異なることなど、加工の初期過程に関する知見が得られた。また、アモルファス変成部のみがアブレーションへと進展している条件も得られ、選択的な加工が可能であることが示された。さらに、Si 基板表面にアモルファスのパターンを描画することに成功した。

研究成果の概要(英文)：The subject of this study is to develop the selective processing of Si surface using amorphous-recrystallization by ultrashort pulsed laser process. using an existing near-infrared ultra-short pulsed laser. Ti:sapphire laser with a wavelength of 800 nm is focused and irradiated on the surface of a single crystalline silicon (Si) substrate with surface orientations of (100) and (111) by changing the pulse energy and the number of irradiations, and the surface was observed.

I found that the progress of the Si surface processing from amorphous alteration to ablation differed depending on the surface orientation and the pulse energy of the laser. Under certain irradiation conditions, it was observed that the amorphous part progressed to ablation. This indicated that amorphous processing is possible. Next, by scanning the Si substrate, we searched for the conditions for forming a linear amorphous phase on the Si substrate surface, and succeeded in drawing an amorphous pattern.

研究分野：量子電子工学

キーワード：短パルスレーザー レーザープロセッシング 変成 レーザー加工 半導体 スライス加工

## 1. 研究開始当初の背景

集積回路に用いられる半導体基板においては、インゴットからスライスレウエハに加工した後に、各種パターンを回路を焼きつけ積層する。基板であるウエハの加工において、現状ではワイヤーソーで機械的にスライスした後に、スライス面を研磨して用いるのが一般的である。この場合、ワイヤーソーの太さに相当する部分は切りシロであり無駄になる。またスライス面においては、表面研磨が必須である。もし、スライス面がスライス工程と共に nm オーダーまで平滑化されていれば、研磨が不要となり、工程が減り、製造コストの削減が可能である。また、研磨工程で懸念されるチッピングなどがなくなり、ウエハ生産のさらなる歩留まり向上が見込まれる。ウエハのスライス加工において、切りシロができるだけ小さく、かつスライス面が平滑で研磨が不要な技術が望まれている。

非接触加工であれば、切りシロを小さくすることが可能である。これまでに、ウエハのスライス加工の実用化を目指して、短パルスレーザーの内部直接加工によるスライスが試みられたが、切断面はミクロンオーダーの凹凸があり、研磨は必須である。現在の半導体産業界のニーズとしては、スライス後の表面に nm クラスの平滑度が求められている。このため、従来の内部直接加工においては、集光した際に作用を及ぼす範囲が深さ方向に縦長になり、結果として、スライス面の凹凸となることが避けがたい。化合物半導体基板においては、内部での光分解と分解した原子の選択的励起によるスライス技術が開発されているが、シリコン基板については、イオンを表面か一定深さまで打ち込み、イオンの振動準位に合わせたマイクロ波で励起することで加熱し切断する手法が有望視されている。

非接触可能技術の一つに短パルスレーザー加工がある。短パルスレーザーを材料内部に焦点を合わせると、非線形吸収により表面ではなく、材料内部のみに加工を施すことができ、スライス加工の可能性はある。これまでの加工方法では、加工痕は、レーザーの集光形状に沿って深さ方向に細長く形成される。この内部加工を材料内部で平面的に走査することでスライス加工は可能であるが、加工痕の形状から、スライス面はミクロンオーダーの凹凸を持つことになり、スライス工程のみで nm オーダーの平滑面を得ることは、ほぼ不可能である。また、これまでに、短パルスレーザーを蒸散 (アブレーション) しきい値より低いフルエンスで結晶シリコン (Si) 表面に照射した場合、Fig. 1 の様に変成した領域が得られ、Si 表面が結晶から非結晶に相変化する事が明らかになっており [1, 2]、この相変化を半導体加工技術に展開可能ではと考えた。

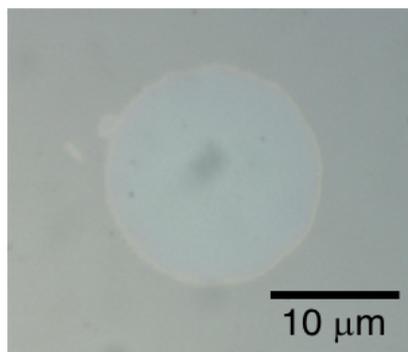


Fig. 1 レーザーをアブレーションしきい値以下で Si 結晶表面に照射した際に誘発されるアモルファスへの変成

## 2. 研究の目的

これまでも短パルスレーザーの内部直接加工によるスライス加工が試みられたが、アブレーションが生じるのは、レーザー集光形状と共に光軸に沿って深さ方向に長い形状となることから、それを二次元的に走査し加工したスライス面は  $\mu\text{m}$  オーダーの凹凸があり、研磨が不要な平滑面を得ることは不可能に近い。本研究で提唱するプロセスは従来技術に比べてレーザーは小さいエネルギー領域で照射し、相変化と加熱を試みるもので、直接加工と比較して、さらに微小な点での加工が可能であると期待している。このレーザー誘起スライス加工が実証されれば、半導体産業における新技術として実用化への展開が大いに期待できるものである。

本研究においては、半導体産業における新しいレーザー加工の新技術として、実用化することを最終目標とし、超短パルスレーザーによる多光子吸収を利用した加工技術の開発を行う。シリコン (Si) の吸収端より低い光子エネルギーを持つ近赤外パルスレーザーを Si 内部に数 100  $\mu\text{m}$  の深さに集光照射することで、2 光子吸収により結晶からアモルファスへの相変化を誘起し、レーザーを二次元的に走査することで、一定深さにアモルファス層の形成を試みる。続いての第 2 のレーザーを同様に内部に集光照射する。これにより、アモルファス層を選択的に加熱することで、結晶/アモルファス層界面において断裂する技術を実現することを目的とする。アモルファス層は再度のレーザー照射により結晶化することが知られており、したがって断裂面も再度結晶相に戻ることが期待される。このプロセスが可能となるレーザーのパラメータを明

らかにし、連続した Si ウェハのスライス加工を実現するレーザーパラメータを模索する。これにより、スライス表面が nm オーダーまでの平滑化が可能と実証できれば、実用化開発へと移行することができる。

### 3. 研究の方法

本研究課題においては、超短パルスレーザーによる Si 表面でもアモルファス相変化からアブレーションに至る過程を観測し、アモルファス相領域を線状に形成するパラメータの模索から開始した。

Fig. 2 に近赤外チタンサファイア (TiS) レーザーによる照射光学系の概略図を示す。

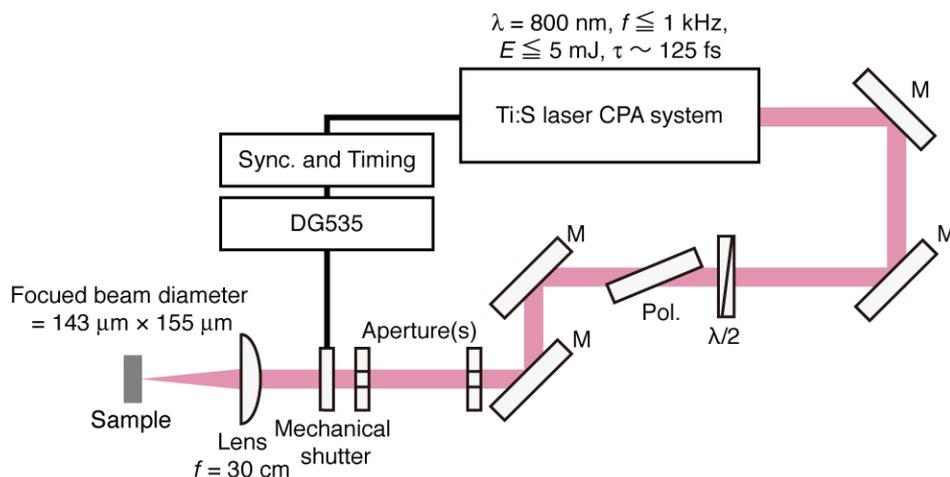


Fig. 2 近赤外 TiS レーザーによる照射光学系

波長 800 nm、パルス幅 125 fs の TiS レーザーの出力は、1/2 波長板ならびに薄膜ポラライザーによりパルスエネルギーが調整され、アパーチャーを通し、メカニカルシャッターでパルス数を変えサンプルに照射された。メカニカルシャッターはレーザー出力と同期した信号により制御され、設定したパルス数を同じタイミングで照射することができる。サンプルには焦点距離 30 cm のレンズにより集光した後に照射した。集光後のビーム形状は、レーザービームプロファイラーにより計測され、Fig. 3 に示す様に 143 μm × 155 μm の楕円形状であった。サンプル基板は 2 軸の自動ステージ上に固定され、ステージの移動距離や走査速度は PC により制御された。サンプルには、10 × 10 × 0.525 mm の真性半導体シリコン (Si) 単結晶基板を用い、表面の面方位が (100) ならびに (111) の基板を選択した。基板表面は鏡面研磨され、表面粗さは PV 値で 7nm、RMS 値で 0.7 nm であった。TiS レーザーを照射した後、デジタルマイクروسコープを用いて、Si 基板表面を観察した。

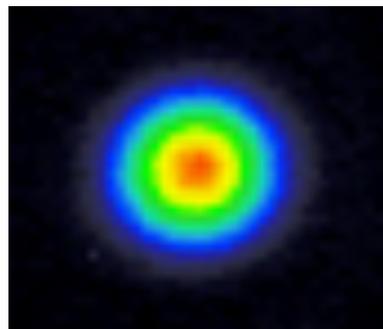


Fig. 3 レーザービームプロファイラーで測定した焦点位置におけるレーザー強度分布

### 4. 研究成果

Fig. 4 に Si(100) 基板に TiS レーザーのパルスエネルギーとパルス数を変えて照射した際に観測された照射痕を示す。結果の確認は顕微鏡下での目視で行った。写真が空欄の条件では、目視では表面の変成が確認できなかったことを示している。

Fig. 4 において、1 パルスのフルーエンスが高くなると、低い照射回数でも照射痕が確認できる様になっていることがわかる。1 パルスのフルーエンスが低い場合は、照射痕は白色の変成が低照射回数で観測される様になった。この白色の領域は、アモルファスへ変成した領域である。0.132 J/cm<sup>2</sup> 以上の照射フルーエンスでは、円環状のアモルファス変成領域が観測された。この場合の中心部は再度結晶性になっていることが知られている。照射フルーエンスが 0.402 J/cm<sup>2</sup> 以上になると、1 ショットでも照射痕を観測することができた。Si 表面の照射においては、低フルーエンスでは、照射回数を増やすにつれ、アモルファス化、再結晶化の後に黒色のアブレーションが生じていることがわかる。レーザー加工において、加工結果は同様に見えても、初期過

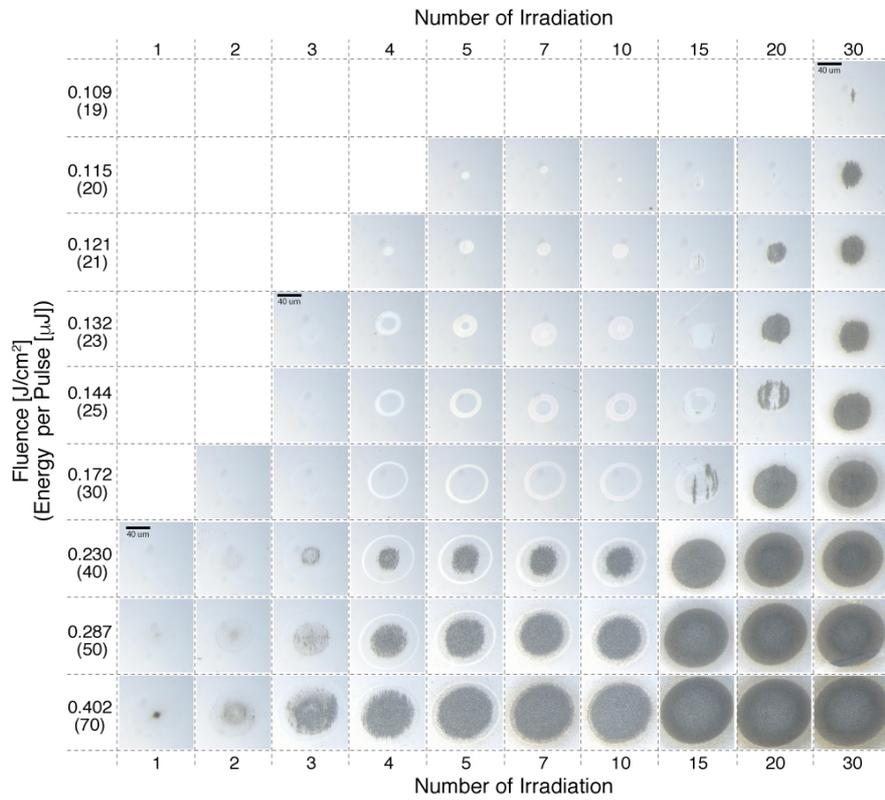


Fig. 4 Si(100) 基板に TiS レーザーを照射した際の加工痕

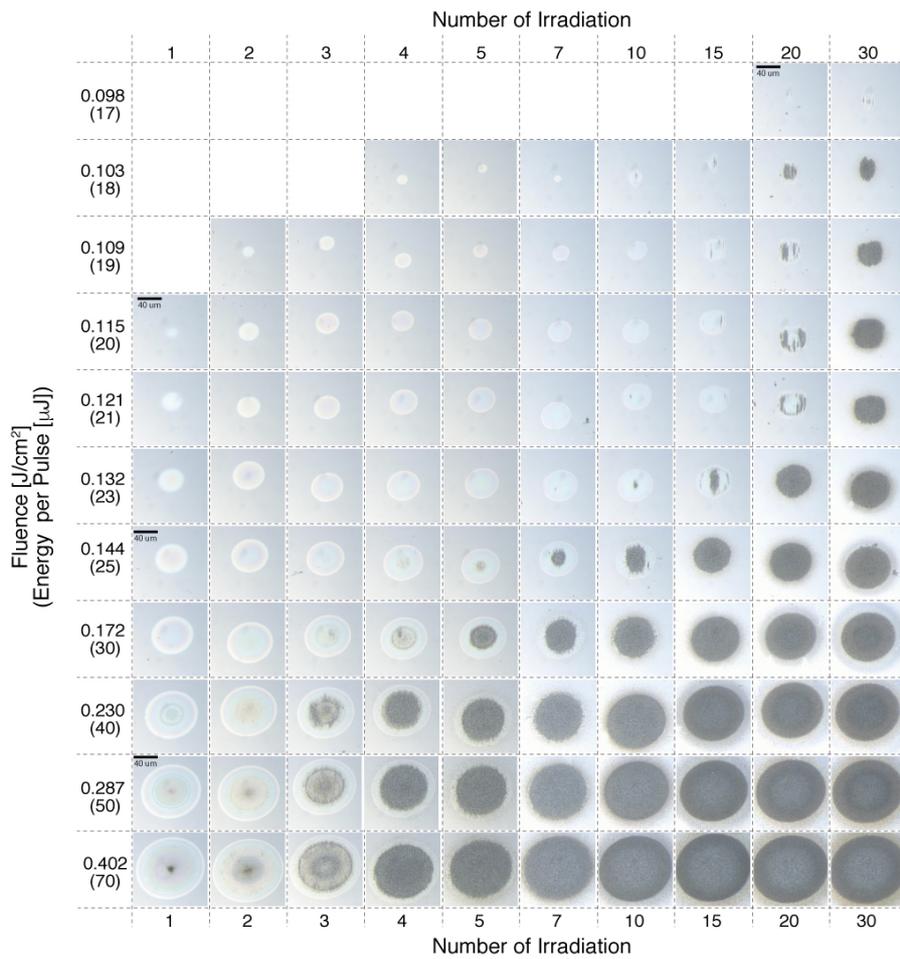


Fig. 5 Si(111) 基板に TiS レーザーを照射した際の加工痕

程は異なることがわかった。また、用いたレーザーの強度は中心部が最も高いにも関わらず、アモルファス部分からアブレーション加工に進展している条件があった。これは、結晶部とアモルファス部のアブレーション閾値が異なることによると考えている。

Fig. 5 の (111) 表面の照射痕においても、(100) と同様ではあるが、(111) のアモルファス変成は (100) 基板より少ない照射回数で観測され始めていることがわかる。また、1 ショットの照射において、(100) 基板では顕著なアモルファス変成が見られなかったが、(111) 基板においては、 $0.115 \text{ J/cm}^2$  以上でアモルファス変成が見られた。また、円環状となる再結晶化も顕著に観測されておらず、アブレーションも (111) 基板の方が、より低フルーエンスで観測された。

この面方位による照射痕の違いは、Si 結晶の熱的な特性が原因と考えている。Si<100> 方向は <111> 方向に比べて、約 5 倍の熱伝導率を持つことが報告されている [3]。したがって、(100) 基板においては、レーザー照射による加熱後に急冷されることから再結晶化が支配的となり、(111) 基板においては、表面の冷却速度が遅いため、アモルファス相として残存したと推測される。また、(111) 面における Si 原子の安定性が関係していることも考えられる。

アモルファス相を加工する手法を開発するためには、検証実験を実施する必要がある。このため、連続したアモルファス相の作成が必須である。得られた結果から、Si (100) 基板を用いる場合は、 $0.12 \text{ J/cm}^2$  付近のフルーエンスで、1 箇所あたりの照射回数が 10 回となる様に基板を走査することで、基板表面にアモルファス相を連続して作成することが可能であることが示された。

自動ステージの走査速度を調節し、TiS レーザーを照射した場合に得られた照射痕の一例を Fig. 6 に示す。TiS レーザーの照射条件を最適化することで、線状にアモルファス領域を形成することに成功した。さらに、アモルファス領域のみを選択的に加工が可能か確認するために、この作成した線状アモルファス部に対して、結晶質ではアブレーションがおきない様に TiS レーザーのパラメーターを設定し、アモルファス部に対して垂直に走査し、照射した。この結果、両方の照射部分が重なる領域のみアブレーション加工が観測され、アモルファス領域のみの加工が可能であることが実証された。今後はバルク Si 内部でのアモルファス化の可能性について検討し、実証実験へと展開する予定である。

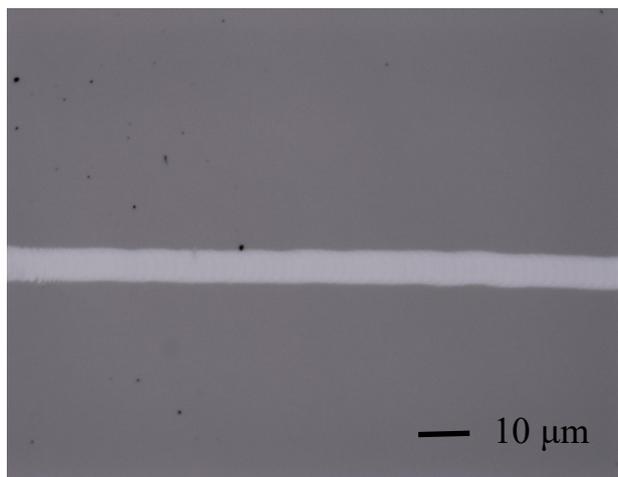


Fig. 6 Si (100) 基板上に作成した線状アモルファス領域

<引用文献>

- [1] R. Izawa, Y. Setuhara, M. Hashida, M. Fujita and Y. Izawa, Jpn. J. of Appl. Phys. **45**, 5791 (2006).
- [2] 井澤友策, 藤田雅之, O plus E **30**, 475 (2008).
- [3] 橋本敬史, 川上太一, 国枝正典, 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 501 (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 甲藤正人, 横谷篤至, 加来昌典, 大久保友雅, 塚本雅裕	4. 巻 No. RTM-20-06 ~ 11
2. 論文標題 フェムト秒レーザーによるSi表面の相変化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー学会第546回研究会報告	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 甲藤正人, 横谷篤至, 加来昌典, 大久保友雅, 塚本雅裕
2. 発表標題 フェムト秒レーザーによるSi表面の相変化
3. 学会等名 レーザー学会第546回研究会 「フォトニクス・ワークショップ in 九州」
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------