

太陽電池性能向上を目指した高品位レーザ加工による表面構造付与

東海大学 総合科学技術研究所
特任教授 橋田昌樹

(2018 年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2018203-A3)

キーワード：太陽電池，微細構造，高品位レーザ加工

1. はじめに

単結晶 Si 太陽電池は反射率の低減のために 1~10 μm 程度のピラミッド構造が表面付与され、太陽光波長 500 nm の反射率が 10%程度に改善されている。さらに反射率の低減を目指すために、ピラミッド構造表面に 1 μm 以下のナノ微細構造を形成させたダブルテクスチャー構造にした太陽電池の研究が注目されている。しかし、製造時間や加工領域（大面積加工）の課題がある。また、従来のフォトリソグラフィよりも安価な高品位レーザ加工が有望視されている⁽¹⁾。

パルスレーザを用いた高品位レーザ加工（レーザ微細加工）は固体の熱緩和時間（数ピコ秒程度）に比べてパルス幅が短く、非熱的に加工可能なフェムト秒レーザに関する報告が近年の報告の中で多くの割合を占めている。しかしながら、固体の熱緩和時間に比べてパルス幅が長いナノ秒レーザにおいても、エキシマレーザのような紫外域で発振する短波長レーザを用いて照射条件を調整すれば、アブレーションの熱影響を低減することが可能である。一般的に、ナノ秒レーザやフェムト秒レーザによる微細加工でナノ周期構造などの微細構造を形成させた報告はあるが、マイクロメートルオーダーの構造表面にさらにナノ微細構造を形成させた報告例は皆無である。これゆえ、ナノ秒レーザやフェムト秒レーザを用いてシリコン太陽電池のピラミッド構造表面に加工した論文報告はない⁽²⁾。

太陽電池のピラミッド構造表面に、大気中において高品位レーザ加工（レーザ微細加工）を施すことができれば、高速で大面積低減の加工が実現できる。本研究の目的は、パルスレーザを用いてシリコン太陽電池のピラミッド構造表面にナノ微細構造を形成させ、結晶性を保持しつつ反射率の低減を図ることである。

本研究では、パルスレーザにより微細構造を形成させるために重要なパラメータのアブレーション閾値に着目し、まず、その測定を行った。測定したアブレーション閾値を基にシリコン太陽電池表面に微細構造形成を行い、表面形状のレーザ照射パラメータ（フルエンス、パルス数、波長、パルス幅など）依存性を調べた。また、微細構造を形成させた太陽電池の結晶構造はラマン分光法で評価し、反射特性は反射スペクトルもしくは表面形状をから評価した。

2. レーザ入射角度評価

シリコン太陽電池表面はピラミッド構造が施されているため、太陽電池基板に垂直にレーザ照射してもピラミッ

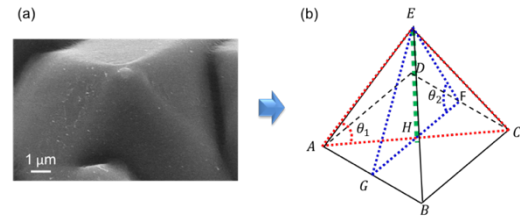


図 1 Si 太陽電池表面のピラミッド構造と正四角錐

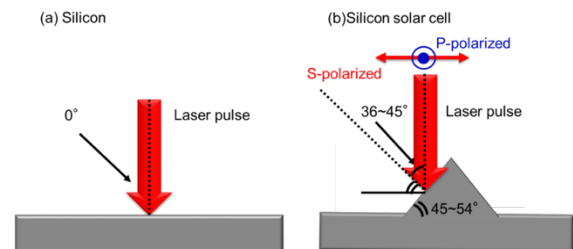


図 2 Si 及び Si 太陽電池に対するレーザ入射角度

ド構造に対して入射角度が生じる。ここでは、ピラミッド構造の斜面の角度を算出することでレーザ入射角度の評価を行った。図 1(a) (b) はそれぞれシリコン太陽電池表面のピラミッド構造及び正四角錐を示す。図 2(a) (b) はそれぞれシリコン及びシリコン太陽電池に対するレーザ入射角度を表している。ピラミッド構造を正四角錐と仮定した場合、正四角錐の斜面の角度は、図 1 (a) に示す θ_1 と θ_2 の間になる。三平方の定理より $\theta_1=45^\circ$ と $\theta_2=54^\circ$ になり、ピラミッド構造の斜面の角度は 45~54° の間にある。従って、シリコン太陽電池に対してレーザ入射角度は図 2(b) のように 36~45° となる。

3. ナノ秒レーザによる微細構造

3.1 微細構造形成実験

図 3 にはナノ秒レーザによるアブレーション閾値及び微細周期構造形成実験の配置図を示す。実験では発振波長 308 nm、レーザパルス幅 20.6 ns、繰り返し周波数 10 Hz の XeCl エキシマレーザ (COMPex102, Lambda Physik) を用いた。XeCl エキシマレーザの光路を青線、アライメント用 He-Ne レーザの光路を赤線で示す。XeCl エキシマレーザから発振されたパルスはアパーチャー (5 mm ϕ) で切り取られた後、偏光プリズムと半波長板で構成されたエネルギー減衰器でエネルギーを 1~1/200 程度の範囲で変化させ、照射フルエンスを制御した。エネルギー減衰器通過後のレーザは直線偏光となる。その後、焦点距離 1000 mm の凸レン

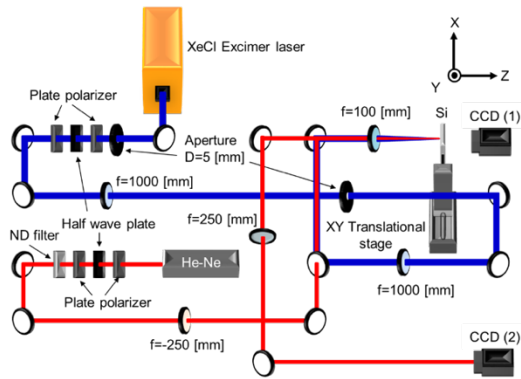


図3 XeClエキシマレーザを用いたアブレーション閾値測定及び微細構造形成実験の光学配置

ズとアパーチャー（直径 0.5 mm φ）で構成されたスペーシャルフィルタによりガウシアン形状のビームプロファイルに改善され、焦点距離 100 mm の凸レンズで集光し、試料に対して図 2 の入射角度（材料により入射角度の取り扱いは違う）で照射した。照射位置でのビーム径は CCD (1) カメラで測定し、約 47 μm (FW ϵ^{-1} M) であった。He-Ne レーザでバックライトした試料表面を CCD (2) カメラ上に像転送することで表面の変化をリアルタイムで観察した。照射パルス数は 1~12000 pulses の間で変化させ、実験中の XeCl エキシマレーザパルスのエネルギー安定度は 15 % (RMS) であった。試料は鏡面研磨されたシリコン（大きさ約 2 cm×2 cm, 表面粗さ 0.01 μm, 厚さ 605-645 μm, 抵抗率 1-100 Ωm, 結晶軸 (100)）及びシリコン太陽電池を用いた。ここで、表面粗さは高さ分布の二乗平均平方根高さ（二乗平均平方根高さは高さ分布の標準偏差）を示す。

シリコン及びシリコン太陽電池のアブレーション閾値（融解閾値）はそれぞれ 1.4 J/cm 2 と 0.50 J/cm 2 であった。シリコン太陽電池への微細構造形成は、融解閾値（0.50 J/cm 2 ）より低い 0.41 J/cm 2 で 42 pulses 照射することにより、非熱的に格子間隔 200-300 nm の微細構造を形成させた（図 4）。シリコン太陽電池の融解閾値 0.5 J/cm 2 近傍のフルエンスである 0.2-0.6 J/cm 2 でも微細構造が形成された。また、 $F=0.2$ J/cm 2 と $F=0.4$ J/cm 2 ではドット形状の微細構造も観察された。

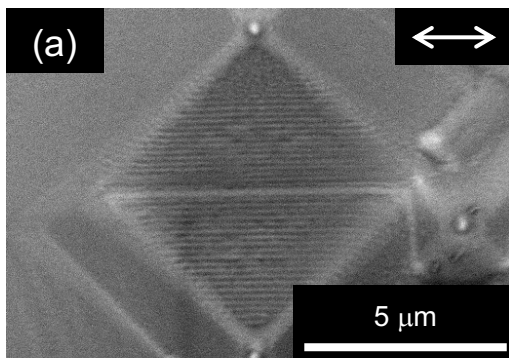


図4 ナノ秒レーザにより形成された微細構造（矢印は偏光方向を示す）

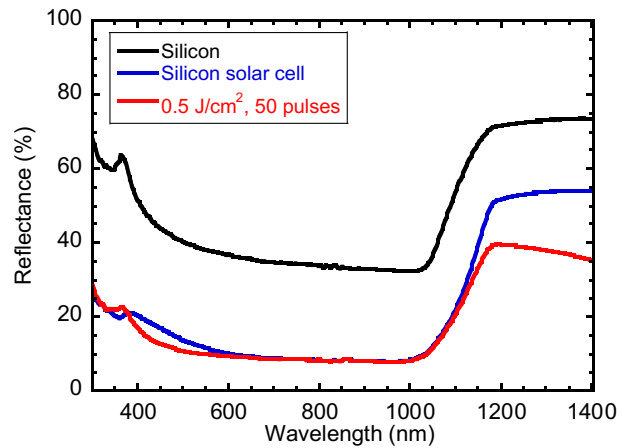


図5. Si および Si 太陽電池の反射スペクトル(p 偏光, $F=0.5$ J/cm 2 , $N=50$ pulses)

図 5 には、微細構造を形成させたシリコン太陽電池、シリコン基板、ピラミッド構造を有するシリコン太陽電池の反射スペクトルの測定結果を示す。

黒線がシリコン基板、青線が表面に 1~10 μm のピラミッド構造を有するシリコン太陽電池、赤線がラミッド構造を有するシリコン太陽電池表面に p 偏光、0.5 J/cm 2 、50 pulses で照射した反射スペクトルを示す。青線は 300~1400 nm の領域においてシリコン基板に比べて反射率が約 20 % 改善していることが分かる。ピラミッド構造を有するシリコン太陽電池表面にナノ周期構造を形成することで 500nm 付近の反射率が約 5 % 改善することが分かった。特に、太陽光スペクトル強度が高い光の波長は 500 nm のため更に太陽電池の性能向上が期待できる。反射率の低減は主に表面粗さ 23.5 nm 程度のナノ微細構造が関係しているとすると実験結果をうまく説明できる。特に波長 500 nm において反射率が約 2 % 低減していた（詳細は 3.2 で述べる）。波長 400 nm 以下の領域は、反射率が増えているが結晶 Si 太陽電池の感度の低い領域である。また、顕微ラマン分光法を用いてナノ微細構造形成したシリコン太陽電池の結晶構造を評価した。結果、歪および結晶性にほとんど変化がみられなかったためシリコン太陽電池は機能を維持したまま性能が向上していることが分かった。

3.2 微細構造による反射率低減

微細構造による反射率の低減に関しては多重散乱や光閉じ込め効果によるものとされている⁽³⁾。ピラミッド構造の大きさが反射スペクトルの波長領域（300-1400 nm）の光の波長に比べて十分に大きい場合、反射率の低減の評価に必要な、拡散透過率 T_D は次式で表される。

$$T_D = \frac{\pi a^2}{L_c^2} Q_{sca} \quad (3-1)$$

ここで、 a : 分布平均球形粒子の半径の大きさ、 πa^2 : 半径 a の分布平均球形粒子の断面積、 Q_{sca} : 散乱効率を表す。式(3-1)より拡散透過率は光の波長に依存せず約 20 % を示

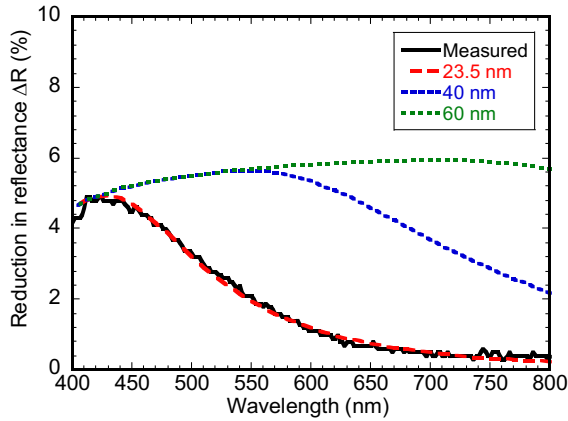


図6 反射率の低減量と波長の関係

す⁽³⁾. ピラミッド構造は1~10 μm であり, この値を上式に代入し反射率を計算すると約20%の低減になる. ゆえにピラミッド構造が約20%の低減に寄与していると考察される.

一方, 微細構造の大きさが光の波長よりも小さい場合, 拡散透過率 T_D は次式で表される.

$$T_D = T_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{2\pi\sigma_{rms}|n_0 - n_1|}{\lambda} \right)^\gamma \right] \right\} \quad (3-2)$$

ここで, T_0 : 表面構造(拡散+鏡面)透過率, σ_{rms} : 表面粗さ(二乗平均平方根高さ), n_0, n_1 : 表面を構成する材料の屈折率, λ : 光の波長, γ : 表面の高さ分布関数に依存するもので1.5~3を示す. 式(3-2)を反射率の低減量 ΔR で表すと

$$\Delta R = \left\{ 1 - \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \right\} T_D \quad (3-3)$$

となる.

p偏光, フルエンス0.5 J/cm², 照射パルス数100 pulsesで微細加工したシリコン太陽電池の反射率の低減量を式(3-3)を用い表面粗さ23.5 nm, 40 nmおよび60 nmとして計算した. 結果を図6に示す. 実験は, 表面粗さが23.5 nmとした時の計算結果と一致しており, 波長500 nm近傍の反射率は微細構造の表面粗さに依存することが分かった. 更に大きな表面荒さの構造が形成できれば, より大きな低減に繋がることを計算は示している.

4. フェムト秒レーザーによる微細構造形成

フェムト秒レーザー装置(IFRIT, Cyber Laser, レーザ波長800nm, 400nm レーザパルス幅150 fs, 繰り返し周波数1 kHz)により微細構造形成実験を行った. 実験では焦点距離100 mmのレンズで集光し, 図2に示す入射角度で試料表面に照射した. CCD(1)を用いて照射位置でのビームを観察し, ビーム形状はガウシアン形状で, ビーム径は約25 μm (FW σ^{-1} M)であった. 実験中のエネルギー安定度は約10%

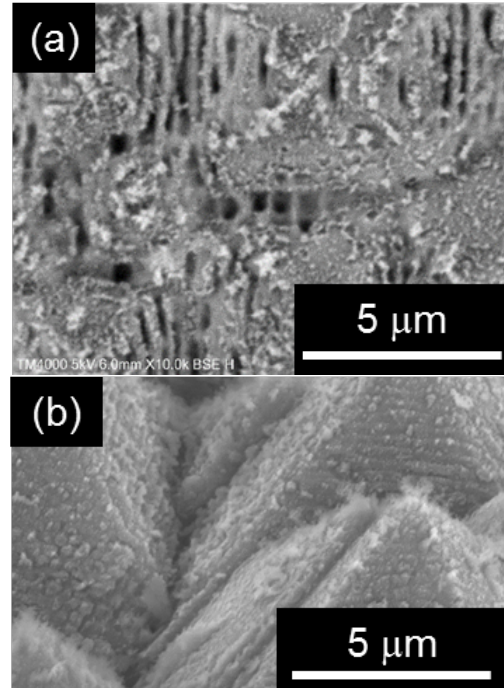


図7 (a) $\lambda=800$ nm, $F=0.15$ J/cm², $N=100$ pulses, (b) $\lambda=400$ nm, $F=0.10$ J/cm², $N=1000$ pulses

であった.

アブレーション閾値よりわずかに高いフルエンスに設定し表面に微細構造の形成を行った. 形成された微細構造のSEM写真を図7に示す.

いずれのレーザーもアブレーション閾値近傍のフルエンスに設定することで微細構造が形成された. しかし, 反射率を測定するには2cm \times 2cm四方に微細構造形成することが必要である. 現状のレーザーでは数日間連続して照射する必要があり現実的でない. 目視では明らかに黒色化することがわかるが反射率低減の数値化には課題が残る. そこでまず, 表面荒さから反射率低減を計算することにした. 第2高調波(波長400 nm)と基本波(波長800 nm)のアブレーション閾値近傍のフルエンス(0.15 J/cm² for 800nm, 0.10 J/cm² for 400nm)で1000 pulses照射するとシリコン表面に微細構造が形成され, それぞれ, 表面粗さは80 nm, 90 nmであった. 反射率はこの表面粗さの数値を式(3-3)に代入し, 式(3-3)の ΔR を用いて次式より計算した⁽³⁾. 結果を図8に示す. 照射前のシリコンおよびシリコン太陽電池の反射率のスペクトル(測定値)は, それぞれ細実線と太実線で表す. 第2高調波(波長400 nm)と基本波(波長800 nm)についてアブレーション閾値近傍で1000 pulses照射するとシリコン表面に微細構造が形成され, それぞれ, 表面粗さは80 nm, と90 nmであった. この表面荒さから反射スペクトルを計算すると更に反射率が改善(低減)する. 目視による観察では, 波長400 nmのものが顕著に黒色化していた. 波長800 nmの場合の黒色化は, 波長400 nmに比して少なかった. これはSEM観察結果からピラミッド構造が一部消失し, ピラミッド構造による反射率の寄与

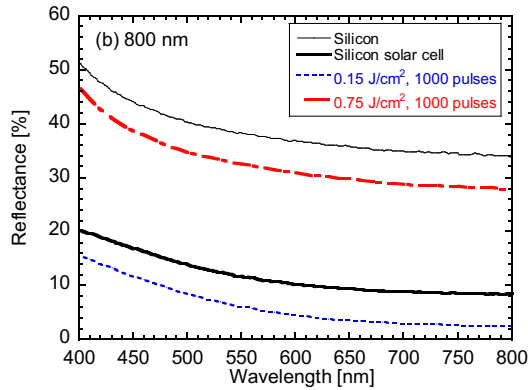
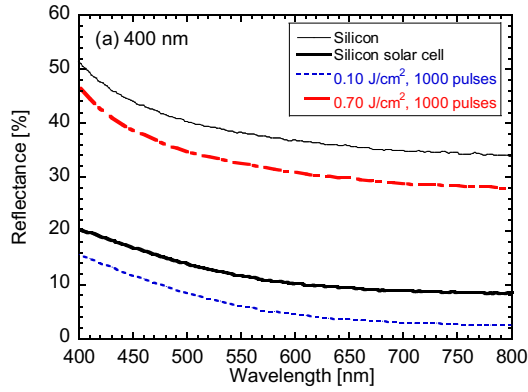


図8 Si 太陽電池の反射率のスペクトル

が小さくなったためであると考えている。

図8の破線と太実線は実験と計算したスペクトルを示す。この比較により微細構造を形成させることで波長400~800 nmの領域において反射率の低減が4~8%程度で、特に太陽光スペクトル強度の高い波長領域の500 nmにおいて、反射率が約5.5%の低減が期待されることが示唆された。

一方、シリコン太陽電池に対して第2高調波(波長400 nm)で0.70 J/cm², 1000 pulses照射すると表面粗さ6.8 μm, 基本波(波長800 nm)で0.75 J/cm², 1000 pulses照射すると表面粗さ14.8 μmを示した。しかしSEM観察によりピラミッド構造が消失していることが分かった。それぞれσ_{rms}=6.8 μm, 14.8 μm, R₀をシリコンの反射率として計算した。計算で得られた反射率のスペクトルを一点鎖線(赤)に示す。計算で得られた反射スペクトルは微細構造形成のレーザー波長に関係なく同等であった。特筆すべきはシリコンの反射率のスペクトル(細実線)に比べて低い、シリコン太陽電池の反射率のスペクトル(太実線)よりも約20%高かった。これはピラミッド構造がレーザー照射により消失していることによると考えている。

5. 各種レーザー形成微細構造の太陽電池性能の比較

太陽電池性能向上の観点からナノ秒レーザー及びフェムト秒レーザーで形成された微細構造の性能を比較した(図9)。これまでの成果からシリコン太陽電池の性能向上の観点

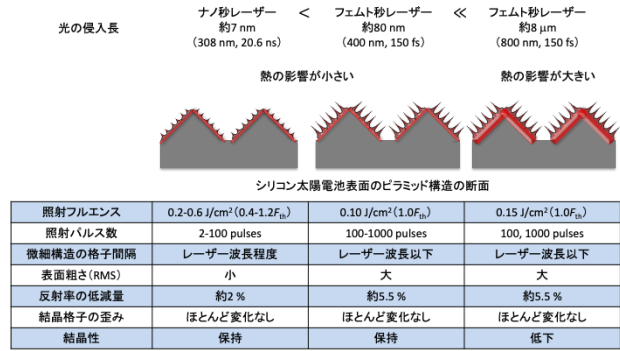


図9 各種レーザーにより形成される微細構造

から第2高調波(波長400 nm)のフェムト秒レーザーで、フルエンス0.10 J/cm², 1000 pulses照射した時に形成される微細構造が有効であることが分かった。

6. まとめ

ナノ秒レーザー及び外フェムト秒レーザーを用いてアブレーション閾値近傍のフルエンスで照射し、シリコン太陽電池の表面に微細構造を形成した。特に、紫外フェムト秒レーザーでは紫外ナノ秒レーザーに比べて低いフルエンス(0.10 J/cm²)でシリコン太陽電池表面上に結晶構造を保持したままナノサイズの大きさの微細構造が形成できることが分かった。シリコン太陽電池の反射率低減という観点から紫外フェムト秒レーザーによる微細構造形成が有効であることが示された。3種類のレーザーによる微細構造の比較から、光の侵入長が少ない波長で、短パルスのレーザーが太陽電池の性能向上には有効であり高品位レーザー加工実現に最適であることが分かった。

謝辞

本研究について、実験の実施及び考察についてご協力いただいた全炳俊助教、細川誓君、田中陽平君(京都大学)、草場光博教授、兒子史崇君(大阪産業大学)、坂上仁志教授(核融合科学研究所)、塚本雅裕教授(大阪大学接合科学研究所)、岩森 暁教授、山口 滋教授(東海大学)に心から感謝申し上げます。また、本研究の一部は、公益財団法人天田財団重点研究開発助成(課題番号 AF-2018203-A3)、京都大学化学研究所の共同利用・共同研究(課題番号 2019-9, 2018-6)、H30-R9年度文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118070187、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「エネルギー・環境新技術先導プログラム/新機能材料創成のための高品位レーザー加工技術の開発」、京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッションエネルギー研究拠点(課題番号 ZE2020B-31, ZE2021A-38)、NIFS共同研究(NIFS17KNTS053, NIFS20KNTS067)及び大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度の支援を受けて行われた。

成果論文

- [1] 兒子史崇, 橋田昌樹, 阪部周二, 草場光博: “エキシマレーザー非熱的加工によるシリコン太陽電池表面ナノ微細構造形成”, レーザー研究, Vol. **47**, No. 3, pp. 160-163 (2019).
- [2] M. Hashida, Y. Furukawa, S. Inoue, S. Sakabe, S. Masuno, M. Kusaba, H. Sakagami, M. Tsukamoto, “Uniform LIPSS on titanium irradiated by two-color double-pulse beam of femtosecond laser”, J. Laser Appl. (2020), Vol.**32**, 022054.
- [3] F. Nigo, M. Hashida, M. Tsukamoto, S. Sakabe, M. Kusaba: “Reflectance and crystallinity of silicon solar cells with LIPSS produced by XeCl excimer laser pulses”, Appl. Phys. A **126**, pp.129-1-129-5(2020).
- [4] 細川誓, 橋田昌樹, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: “物質表面周期構造形成を目指した高強度テラヘルツ波光源開発”, 電気学会論文誌 A **140** 巻 8 号 (2020) 378-383.
- [5] 兒子史崇, 橋田昌樹, 塚本雅裕, 阪部周二, 草場光博: “紫外フェムト秒レーザー照射されたシリコン太陽電池の表面粗さと結晶構造”, 電気学会論文誌 A **140** 巻 8 号 pp. 401-406 (2020).
- [6] Y. Tanaka, C. Hosokawa, M. Hashida, H. Zen, T. Nagashima, N. Ozaki, S. Inoue, S. Sakabe, “Mid-infrared free electron laser induced periodic surface structures on semiconductors” SPIE. Vol.**11673**, 116730U(2021).
- [7] K. Takenaka, N. Shinohara, M. Hashida, M. Kusaba, H. Sakagami, Y. Sato, S. Masuno, T. Nagashima, M. Tsukamoto: “Delay times for ablation rate suppression by femtosecond laser irradiation with a two-color double-pulse beam”, Appl. Phys. Lett. **119**(2021)231603.
- [8] 草場光博, 橋田昌樹: “パルスレーザーによるシリコン太陽電池表面の反射率低減”, 第 97 回レーザー加工学会講演集 2022 (4page) .

成果に関する解説論文

- (1) 橋田昌樹: “フェムト秒レーザー加工の加工率向上に関する研究 “: 光アライアンス 1 月号 (2020) pp. 28-31.
- (2) 橋田昌樹, 古川雄規, 井上峻介: “フェムト秒レーザーアブレーションによる表層加工の学理解明に向けた取り組み”, スマートプロセス学会第 10 巻 2 号 (2021) pp. 53-57.
- (3) 橋田昌樹: “レーザー誘起微細構造形成解明を目指したその場計測”, レーザー加工学会第 28 巻 2 号 (2021) pp. 39-42.

国内外学会・研究会における成果発表

- [a-1] F. Nigo, M. Hashida, S. Sakabe, N. Shinohara, M. Tsukamoto, M. Kusaba, “Reflectance and Crystallinity of Silicon Solar Cells with LIPSS Produced by XeCl Excimer Laser”, The 15th International Conference on Laser Ablation, Mon PS-118, 9 November, 2019 (Maui-Hawaii, USA).

[a-2] 兒子史崇, 橋田昌樹, 阪部周二, 草場光博, “微細構造を形成したシリコン太陽電池の結晶構造評価”, 平成 30 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, 4-P-17, 2018 年 9 月 4 日 (イーグレひめじ) .

[a-3] 兒子史崇, 橋田昌樹, 阪部周二, 草場光博, “非熱的レーザー加工された Si 太陽電池の結晶構造評価”, レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, 12pXIII6, 2019 年 1 月 12 日 (東海大学).

[a-4] 細川誓, 橋田昌樹, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: “テラヘルツ波を用いた長周期物質表面構造形成のダイナミックスの観察を目指して” レーザー学会学術講演会第 39 回年次大会, 2019 年 1 月 12 日 (東海大学).

[a-5] 細川誓, 橋田昌樹, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: “テラヘルツ波誘起表面周期構造形成の高時間分解観測を目指した高強度テラヘルツ波光源開発” 日本物理学会第74 回年次大会, 2019年3月17日 (九州大学)

[a-6] C. Hosokawa, M. Hashida, T. Nagashima, S. Inoue, S. Sakabe: “Development of intense terahertz source aiming at highly time resolved measurement of terahertz induced periodic surface structure formation”, The 8th Advanced Lasers and Photon Sources, 2019年4月 (パシフィコ横浜).

[a-7] M. Hashida, M. Kusaba, F. Nigo, T. Nagashima, A. Irizaiwa, H. Sakagami, A. Gouda, Y. Furukawa, S. Inoue, S. Sakabe, “Formation of fine LIPSS on metals irradiated by double pulse beam of femtosecond laser”, FLAMN-2019, 3 July 2019, St Petersburg, Russia.

[a-8] M. Hashida, “LIPSS formation and ablation thresholds of metals irradiated by femtosecond laser pulse”, Mini-Workshop on Nonlinear Response in Laser-Matter Interaction, 2019 年 7 月 8 日, KPSI, QST, Japan.

[a-9] 兒子史崇, 橋田昌樹, 升野振一郎, 阪部周二, 塚本雅裕, 草場光博: “フェムト秒レーザー照射によるシリコンおよびシリコン太陽電池の表面形状変化と結晶構造”, 電気学会光応用・視覚研究会, LAV-19-22, 2019 年 8 月 30 日 (京都大学化学研究所碧水舎).

[a-10] 田中陽平, 細川誓, 橋田昌樹, 全炳俊, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: “レーザー誘起周期構造形成のためのその場観察を目指した中赤外 FEL を用いた実験”, 電気学会光応用・視覚研究会, 2019 年 8 月 30 日 (京都大学化学研究所碧水舎).

[a-11] 細川誓, 橋田昌樹, 井上峻介, 阪部周二: “高強度テラヘルツ波の発生と物質表面での周期構造形成に関する研究”, 電気学会光応用・視覚研究会, 2019 年 8 月 30 日 (京都大学化学研究所碧水舎).

[a-12] 細川誓, 橋田昌樹, 井上峻介, 阪部周二: “テラヘルツ波誘起表面周期構造の高時間分解観測を目指した高強度テラヘルツ光源開発”, 第 47 回応用物理学会秋季年次大会, 2019 年 9 月 18-21 日 (北海道大学).

[a-13] 橋田昌樹: “超短パルスレーザーを用いた表面の微細加工の基礎と応用” 2019 年度多元技術融合光プロセス

研究会第3回研究交流会 2019年11月5日(産業技術総合研究所)

[a-14] M. Hashida, Y. Furukawa, S. Inoue, S. Sakabe, S. Masuno, M. Kusaba, H. Sakagami, M. Tsukamoto, "Uniform LIPSS on titanium irradiated by two-color femtosecond double-pulse", 2019年11月22日, Visual JW2019&WSE2019, Osaka, Japan.

[a-15] 児子史崇, 橋田昌樹, 升野振一郎, 阪部周二, 塚本雅裕, 草場光博, "フェムト秒レーザー照射により形成されるシリコン太陽電池表面の微細構造", 令和元年電気関係学会関西連合大会, 2019年12月1日(大阪市立大学).

[a-16] 児子史崇, 橋田昌樹, 升野振一郎, 阪部周二, 塚本雅裕, 草場光博, "800 nm と 400 nm のフェムト秒レーザー加工されたシリコン太陽電池表面の黒色化と結晶構造の比較", レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 2020年1月20日(仙台国際センター).

[a-17] 田中陽平, 細川 誓, 橋田昌樹, 全 炳俊, 長島 健¹, 井上峻介, 阪部周二: "中赤外自由電子レーザーを用いた各種半導体材料における超微細 LIPSS 形成閾値の比較", レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 2020年1月20日(仙台国際センター).

[a-18] 細川誓, 橋田昌樹, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: "物質表面周期構造形成を目指した高強度テラヘルツ波光源開発～さらなる高強度化を目指して～", レーザー学会学術講演会第40回年次大会, 2020年1月20日(仙台国際センター).

[a-19] 細川誓, 橋田昌樹, 長島健, 井上峻介, 阪部周二: "LIPSS 形成を目指したレーザー誘起高強度テラヘルツ波光源開発", 日本物理学会第75回年次大会, 2020年3月(名古屋大学).

[a-20] 橋田昌樹: "フェムト秒レーザーを用いたレーザーアブレーションによる表層加工", 第67回 応用物理学会, 2020年3月13日(上智大学).

[a-21] 橋田昌樹: "フェムト秒レーザーアブレーションによる表層加工の学理解明に向けた取り組み", 「先進機能性表面・構造を創出するレーザー表層加工」研究会, 2020年9月29日(大阪大学).

[a-22] 田中陽平, 細川誓, 橋田昌樹, 全炳俊, 長島健, 尾崎典雅, 井上峻介, "中赤外自由電子レーザー照射された半導体表面における周期構造形成過程の考察", 応用物理学会第81回 秋季学術講演会, 2020年9月8-11日(オンライン).

[a-23] M. Hashida and S. Inoue, "Investigation of material science with high intensity ultrafast laser", 2020年9月8-11日, JSAP-OSA Joint Symposia 2020 (リモート開催).

[a-24] 田中陽平, 細川 誓, 橋田昌樹, 全 炳俊, 長島 健, 井上峻介, 阪部周二: "中赤外自由電子レーザー照射されたシリコン表面における LIPSS 形成のその場観察", レーザー学会学術講演会第41回年次大会, 2021年1月18日(オンライン開催).

[a-25] Y. Tanaka, C. Hosokawa, M. Hashida, H. Zen, T. Nagashima, N. Ozaki, S. Inoue, S. Sakabe, "Mid-infrared free electron laser induced periodic surface structures on semiconductors" SPIE. Photonics West 2021 LASE, 2021年3月(Online).

[a-26] 田中陽平, 細川 誓, 橋田昌樹, 全 炳俊, 長島 健, 井上峻介: "中赤外自由電子レーザー照射により誘起される微細周期構造形成過程のその場観測", 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月15日(オンライン開催).

[a-27] 橋田昌樹: "赤外自由電子レーザーによる物質研究の現状と未来展望", 第35回日本放射光学会年会 2022年1月9日.

[a-28] 橋田昌樹: "パルスレーザーナノアブレーションの基礎と展望" 第96回レーザー加工学会講演集 2022年1月17日(オンライン開催).

[a-29] 橋田昌樹: "Nano-structures on silicon solar cells fabricated by ultraviolet femtosecond laser pulses", 東海大学-DTU Work shop, 2022年3月17日(オンライン開催).

[a-30] 草場光博, 橋田昌樹: "パルスレーザーによるシリコン太陽電池表面の反射率低減" 第97回レーザー加工学会講演会, 2022年5月16日(大阪大学).

参考文献

- (1) W. Shinohara, "Laser Applications Used in Crystalline Silicon Solar Cells," Rev. Laser Eng. Vol. **47**, No. 3, pp.137-141(2019).
- (2) M. Martínez-Calderon, A. Rodríguez, A. Dias-Ponte, M. C. Morant-Miñana, M. Gómez-Aranzadi, S. M. Olaizola, "Femtosecond laser fabrication of highly hydrophobic stainless steelsurface with hierarchical structures fabricated by combining orderedmicrostructures and LIPSS", Appl. Surf. Sci. Vol. **374**, pp. 81-89(2016).
- (3) O. Isabella, J. Krč, and M. Zeman, "Modulated surface textures for enhanced light trapping in thin-film silicon solar cells", Appl. Phys. Lett. Vol.**97**, pp. 101106-1-3(2010).