

紫外フェムト秒レーザ照射されたシリコン太陽電池の 表面粗さと結晶構造

学生員 児子 史崇^{*a)} 正員 橋田 昌樹^{**} 非会員 塚本 雅裕^{***}
非会員 阪部 周二^{**} 正員 草場 光博^{*}

Surface Roughness and Crystallinity of Silicon Solar Cells Irradiated by Ultraviolet Femtosecond Laser Pulses

Fumitaka Nigo^{*a)}, Student Member, Masaki Hashida^{**}, Member, Masahiro Tsukamoto^{***}, Non-member,
Shuji Sakabe^{**}, Non-member, Mitsuhiro Kusaba^{*}, Member

(2019 年 10 月 24 日受付, 2019 年 12 月 14 日再受付)

Nano/microfabrication experiments on the surface of silicon solar cell are performed by ultraviolet femtosecond laser in the fluence range from 0.10-0.70 J/cm². The surface morphology change of sample was observed by a laser scanning microscopy and a scanning electron microscope. The crystallinity of surface irradiated by laser pulses was evaluated by Raman spectroscopy. The ablation threshold for silicon was estimated to be 0.10 J/cm². We successfully produced nano-structures on the surface of silicon solar cell maintaining single-crystalline with the irradiation at the laser fluence of 0.10 J/cm².

キーワード : 紫外フェムト秒レーザ, ナノ微細構造, ナノ周期構造, シリコン, シリコン太陽電池

Keywords : ultraviolet femtosecond laser, nano-structures, LIPSS, silicon, silicon solar cell

1. はじめに

本研究で対象とする単結晶シリコン太陽電池基板（以下、シリコン太陽電池と呼ぶ）は一般に普及しているもので、その表面にはマイクロメートルオーダー（1~10 μm 程度）のピラミッド構造（以下、ピラミッド構造と呼ぶ）が施され、波長 400~1100 nm 程度の領域における反射率を低減させることで 25% を超える変換効率が達成されている。さらなる

変換効率の向上として、ピラミッド構造上に 1 μm 以下の大きさのナノ微細構造物を形成させる方法が提案され注目されている⁽¹⁾⁽²⁾。パルスレーザを用いた表面微細加工^{(3)~(5)}では、レーザ照射条件を調整することで波長と同程度の大きさのナノ周期構造（Laser induced periodic surface structure : LIPSS）が形成でき、太陽電池の光学特性（反射率）の改善が期待される。ナノ周期構造^{(6)~(22)}は半導体に限らず金属や絶縁体でも形成されており、形成機構解明⁽²³⁾に関する研究が進められているが物理機構は明らかにされていない。このため、ナノ周期構造形成のための照射条件は実験により調べられてきた。従来の研究から材料表面にナノ周期構造を形成させるには、アブレーション閾値やレーザ照射条件（レーザ波長、レーザパルス幅、レーザフルエンス、照射パルス数など）が重要パラメータとされている。シリコン太陽電池のピラミッド構造上にナノ周期構造を形成させるためには、これらの重要パラメータを調べることで及びレーザ微細加工後の結晶性が保持されていることを調べる必要がある。これまでに我々は波長 308 nm、パルス幅 20.6 ns、繰り返し周波数 10 Hz の XeCl エキシマレーザを用いて、シリコンおよ

a) Correspondence to: Mitsuhiro Kusaba. E-mail: kusaba@eic.osaka-sandai.ac.jp

* 大阪産業大学大学院工学研究科電子情報通信工学専攻
〒574-8530 大東市中垣内 3-1-1
Graduate School of Engineering, Osaka Sangyo University
3-1-1, Nakagaito, Daito 574-8530, Japan

** 京都大学化学研究所
〒611-0011 宇治市五ヶ庄
ICR, Kyoto University
Gokasho, Uji 611-0011, Japan

*** 大阪大学接合科学研究所
〒567-0047 茨木市美穂が丘 11-1
JWRI, Osaka University
11-1, Mihogaoka, Ibaraki 567-0047, Japan

びシリコン太陽電池のアブレーション閾値を測定し、シリコン太陽電池の融解閾値 (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 $200 \sim 300 \text{ nm}$ のナノ微細構造を形成させることに成功した⁽²⁴⁾。そのシリコン太陽電池の反射スペクトルを測定すると波長 500 nm で反射率が約 2% 低減していた。また、顕微ラマン分光法を用いて結晶構造を評価した結果、歪みおよび結晶性にほとんど変化がない状態でナノ微細構造が形成されていることが明らかになった。反射率の低減は主に表面粗さ $\sigma_{\text{rms}} = 23.5 \text{ nm}$ 程度のナノ微細構造が関係しているとする実験結果をうまく説明できることが分かってきた⁽²⁵⁾。ここで、表面粗さはナノ微細構造の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に相当する値) を示す。紫外域のナノ秒レーザにより形成されるナノ周期構造の高さは $40 \sim 70 \text{ nm}$ と報告されている⁽²⁶⁾。更なる反射率の低減を広いスペクトル範囲で実現するには、より大きな表面粗さ、特に高アスペクト比のナノ微細構造物を作製することが有効であることが報告されている^{(27)~(30)}。レーザパルス幅を短くすることで、より大きな表面粗さのナノ微細構造がピラミッド構造上に実現する可能性があり、さらなる反射率の低減 (拡散透過率の向上) に寄与することが期待される。

本研究では、熱影響が極めて少ない紫外フェムト秒レーザを用いて、シリコン太陽電池表面にアブレーション閾値 ($F_{\text{th}} = 0.10 \text{ J/cm}^2$) の 1~7 倍のフルエンスでレーザ微細加工を行い、その表面粗さと結晶構造を調べたのでその成果について報告する。

2. 実 験

Fig.1 は紫外フェムト秒レーザ微細加工実験の光学配置を示す。波長 800 nm パルスの光路を実線、波長 400 nm パルスの光路を破線で表す。フェムト秒レーザ装置 (IFRIT, Cyber Laser) から発振されたレーザパルス (レーザ波長 800 nm , レーザパルス幅 150 fs , 繰り返し周波数 1 kHz) を BBO 結晶により 2 倍波 (波長 400 nm) に変換した。その後、偏光子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調整して照射フルエンスを制御した。その後、レーザパルスは焦点距離 100 mm のレンズで集光し、試料表面に対して入射角度 0° で照射した。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を示し、そのビーム直径は約 $25 \mu\text{m}$ (FWe^{-1}M) であった。実験中のエネルギー安定度は約 10% であった。He-Ne レーザと CCD(2)カメラを用いることで試料表面の変化した様子をリアルタイムで観察した。試料はシリコン太陽電池 (大きさ約 $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$, 厚み約 $100 \mu\text{m}$, 表面粗さ $1.60 \mu\text{m}$) を用いた。ナノ周期構造の表面粗さは、マイクロメートルオーダーのピラミッド構造により変化量を精密に測定することが出来ない。このため、鏡面研磨されたシリコン基板表面にできたナノ周期構造の表面粗さを測定し、シリコン太陽電池表面のナノ周期構造の表面粗さと同等と考えた。シリコン基板は、大

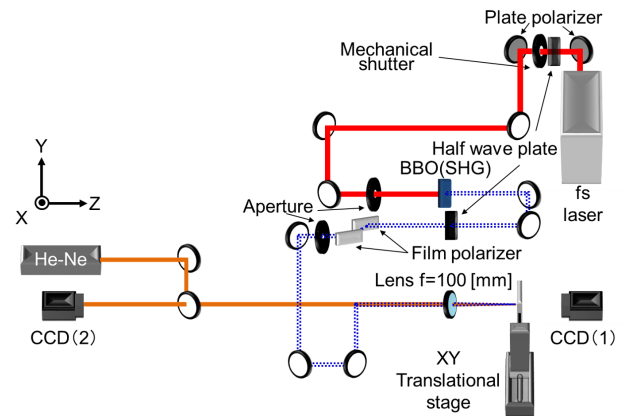


Fig. 1. Experiment setup using femtosecond laser.

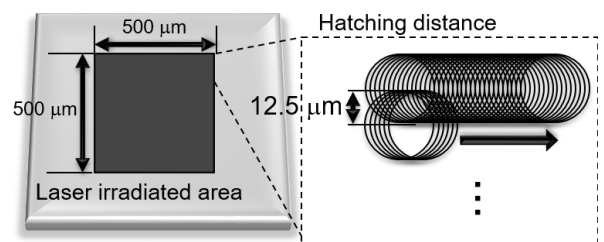


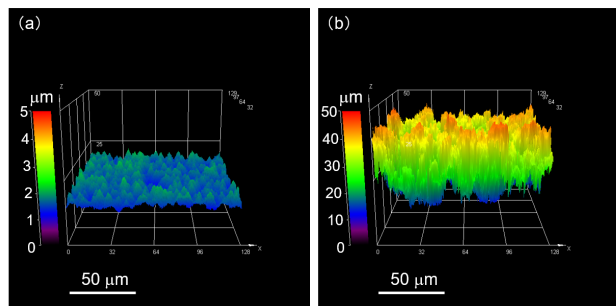
Fig. 2. Image of laser micromachining experiment.

きさ約 $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$, 厚み約 $620 \mu\text{m}$, 抵抗率 $1 \sim 100 \Omega\text{cm}$, 表面粗さ $0.01 \mu\text{m}$ の鏡面研磨されたシリコン基板 (以下、シリコンと呼ぶ) を用いた。

Fig.2 にレーザ微細加工のイメージ図を示す。微細加工は $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ の領域にハッチング距離 $12.5 \mu\text{m}$ で行った。レーザフルエンスは $0.10 \sim 0.70 \text{ J/cm}^2$ の範囲で変化させた。照射パルス数は $20 \sim 1000 \text{ pulses}$ となるように精密ステージで掃引速度を制御し変化させた。シリコンのアブレーション閾値はアブレーション率のレーザフルエンス依存性から評価し 0.10 J/cm^2 であった。

3. シリコン太陽電池の表面形状

レーザ照射されたシリコン太陽電池の表面形状はレーザ顕微鏡 (OLS4500, OLYMPUS) で観察した。レーザ照射前後の表面形状の変化は最大表面凹凸高さ及び表面粗さ (二乗平均平方根高さ) から評価した。レーザ微細加工を行った試料の表面粗さは加工領域の任意の 3 箇所を測定し、それらの値の平均とした。Fig.3(a) と (b) にはそれぞれ 0.10 J/cm^2 および 0.70 J/cm^2 で 1000 pulses 照射したシリコン太陽電池の 3 次元観察像を示す。 0.10 J/cm^2 ではレーザ照射前後で表面形状にほとんど変化がみられなかった。つまり、Fig.3(a) の表面形状はシリコン太陽電池表面にあるピラミッド構造のままであった。一方、 0.70 J/cm^2 では数 10 pulses から変化がはじまり、 1000 pulses 照射で表面形状の最大表面凹凸高さは $36 \mu\text{m}$ 程度を示し、表面粗さは $6.75 \mu\text{m}$ であった (Fig.3(b))。この凹凸は初期のシリコン太陽電池のピラミッド構造 ($13 \mu\text{m}$) に比べて約 3 倍であった。



(a) $F=0.10 \text{ J/cm}^2$, 1000 pulses (b) $F=0.70 \text{ J/cm}^2$, 1000 pulses

Fig. 3. Three-dimensional images of laser irradiated silicon solar cells.

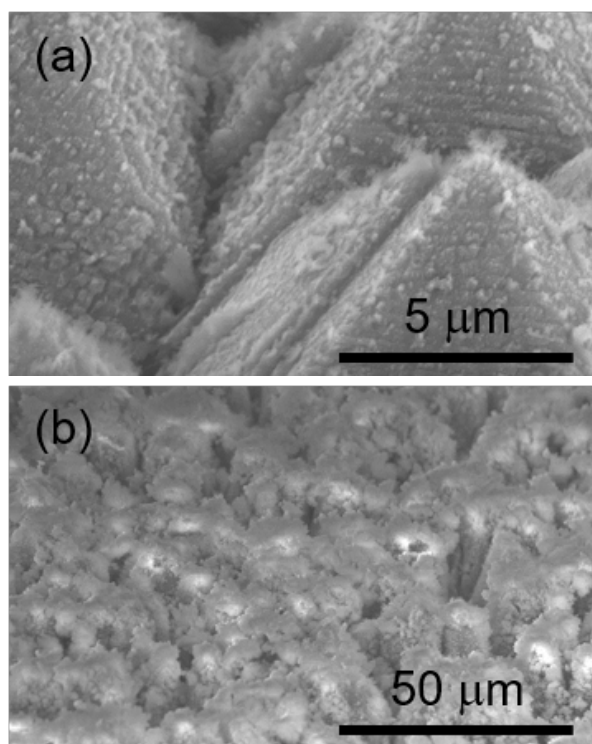


Fig. 4. Surface structures of silicon solar cell irradiated by ultraviolet femtosecond laser pulses for (a) $F=0.10 \text{ J/cm}^2$, 1000 pulses, (b) $F=0.70 \text{ J/cm}^2$, 1000 pulses.

0.10 J/cm²および0.70 J/cm²で照射したシリコン太陽電池表面は電界放出形走査電子顕微鏡 (S4700, Hitachi) で観察し, 得られた顕微鏡像を Fig.4 に示す。0.10 J/cm²ではピラミッド構造全面に 300 nm 程度のナノ周期構造が形成され, 0.70 J/cm²では表面粗さは大きくなるがピラミッド構造が消失していた。

ナノ周期構造を付加したシリコン太陽電池の反射率を測定するには 2 cm×2 cm 以上の領域を加工する必要がある。しかし, この加工には長時間を要するため現実的ではないと考え, 計算により期待される反射率を評価することにした。ナノ周期構造の表面粗さは, マイクロメートルオーダーのピラミッド構造により変化量を精密に測定することが出来なかった。そこでシリコン上に形成したナノ周期構造

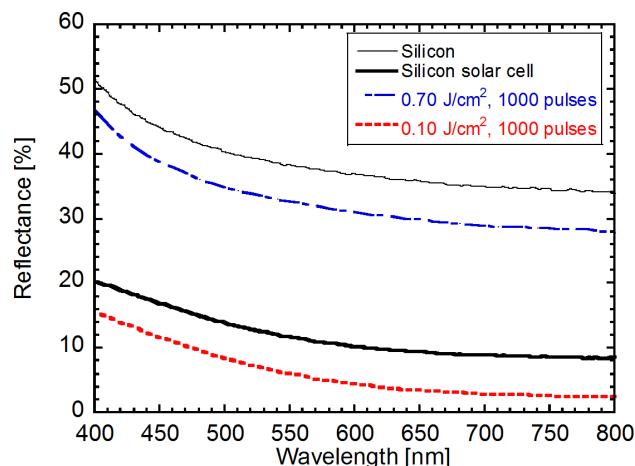


Fig. 5. Measured reflection spectrum for silicon (thin solid line) and silicon solar cell (thick solid line). Calculated reflection spectrum for silicon solar cell irradiated with $F=0.70 \text{ J/cm}^2$ for 1000 pulses (dashed-dotted line) and $F=0.10 \text{ J/cm}^2$ for 1000 pulses (dotted line).

の表面粗さを用いることでシリコン太陽電池の反射率を評価した。シリコンに 0.10 J/cm², 1000 pulses 照射して形成されたナノ周期構造の格子間隔は 300 nm 程度で表面粗さは 80 nm であった。反射率はこの表面粗さの数値を使って次式より計算した⁽¹⁾。

$$R = R_0 - \left\{ 1 - \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \right\} T_D,$$

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

ここで, R : 反射率, R_0 : 照射前の反射率, n_0, n_1 : 表面を構成する材料の屈折率, T_D : 拡散透過率, 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), λ : 光の波長, γ : 表面の高さ分布関数に依存する値 (1.5~3 の範囲) を示す。

計算で得られた反射率のスペクトルを Fig.5 の破線で示す。照射前のシリコン太陽電池の反射率のスペクトル (測定) は太実線で表す。破線と太実線の比較によりナノ周期構造を付加することで波長 400~800 nm の領域において反射率がシリコン太陽電池に対して 4~8%程度低減することが分かった。一方, シリコン太陽電池に対して 0.70 J/cm², 1000 pulses 照射すると表面粗さ 6.75 μm を示したが, ピラミッド構造が消失していたため, $\sigma_{rms}=6.75 \mu\text{m}$, R_0 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に示す。これはシリコンの反射率のスペクトル (細実線, 測定) に比べて低いが, 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%高くなった。これはピラミッド構造による寄与ではなく Fig.4 (b) に示した表面構造による反射率の低減によるものである。これ

らの計算は閾値近傍のフルエンス 0.10 J/cm^2 で形成されるナノ周期構造が反射率低減に有効であることを示唆している。

4. シリコン太陽電池の結晶構造

レーザ照射前後のシリコン太陽電池の結晶性は顕微ラマン分光装置 (NRS-3300, JASCO) を用いて調べた。顕微ラマン分光の空間分解能は水平方向 $1 \mu\text{m}$ 、深さ方向 $1 \mu\text{m}$ である。レーザ微細加工を行った加工領域の 10 箇所のラマンスペクトルのピーク波数およびスペクトル幅の平均から結晶格子の歪みと結晶性を評価した。ピーク波数が高波数側にシフトすると格子欠陥による圧縮応力、低波数側にシフトすると融解による引張応力が加わったことを示す。スペクトル幅が広がると結晶性が低下したことを示す。Fig.6 に未照射、 0.10 J/cm^2 および 0.70 J/cm^2 で 100 pulses 照射したシリコン太陽電池のラマンスペクトルを示す。 0.10 J/cm^2 において 100 pulses 照射ではナノ周期構造が形成されているにもかかわらずラマンスペクトルが未照射のものと一致した。つまり、 300 nm 程度のナノ周期構造が結晶格子の歪みおよび結晶性を変化させることはなかった。これはナノ周期構造の大きさがラマンピークのシフト⁽³¹⁾を起こす大きさ (数 nm 程度) に比べて十分大きいため閉じ込め効果が支配的にならなかったことを示している。 0.70 J/cm^2 の照射ではピーク波数が約 2 cm^{-1} 低波数側にシフトし、スペクトル幅については約 2 倍大きくなっている。これらの変化は引張応力が加わり、結晶性が低下していることを示している。

シリコン太陽電池のピーク波数とパルス数の関係 (結晶格子の歪み評価) を Fig.7 に示す。 0.10 J/cm^2 および 0.70 J/cm^2 の照射ではラマンスペクトルのピーク波数は照射パルス数に依存しなかった。シリコン太陽電池のスペクトル幅とパルス数の関係 (結晶性の評価) を Fig.8 に示す。 0.10 J/cm^2 の照射では結晶性は保持されていたが、 0.70 J/cm^2 の照射では結晶性が低下していることが分かり、どちらのフルエンスで照射した場合もラマンスペクトルのスペクトル幅はパルス数には依存しなかった。

シリコン太陽電池のラマンスペクトルのピーク波数のレ

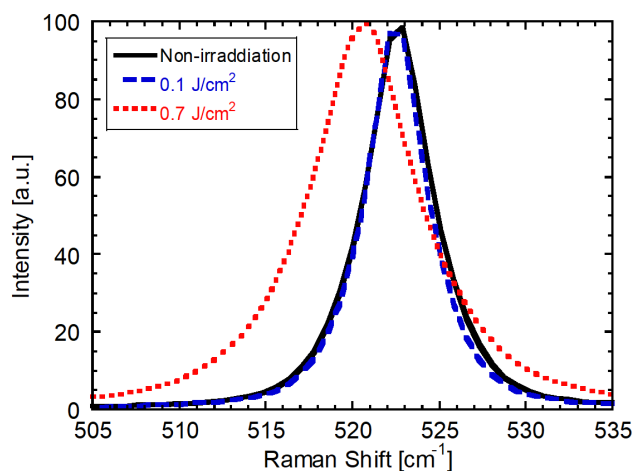


Fig. 6. Raman spectra of silicon solar cells.

ーザフルエンス依存性 (結晶格子の歪み評価) を Fig.9 に示す。 0.20 J/cm^2 までは残留応力がなく、 0.20 J/cm^2 以上で引張

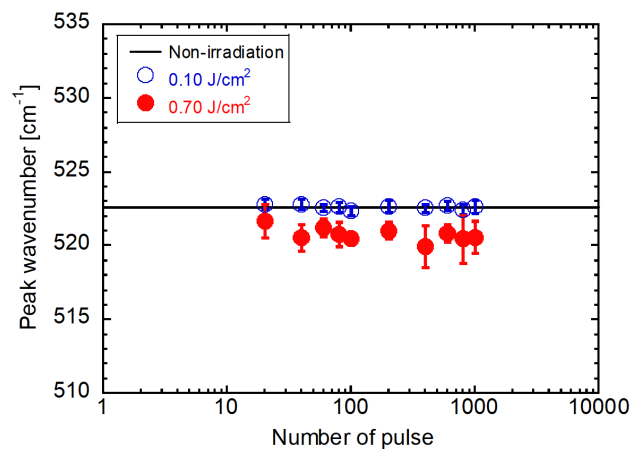


Fig. 7. Relation of peak wavenumber and number of pulse for silicon solar cell.

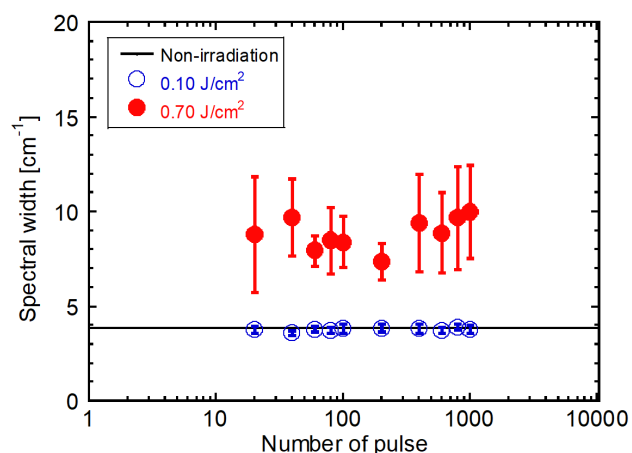


Fig. 8. Relation of spectral width and number of pulse for silicon solar cell.

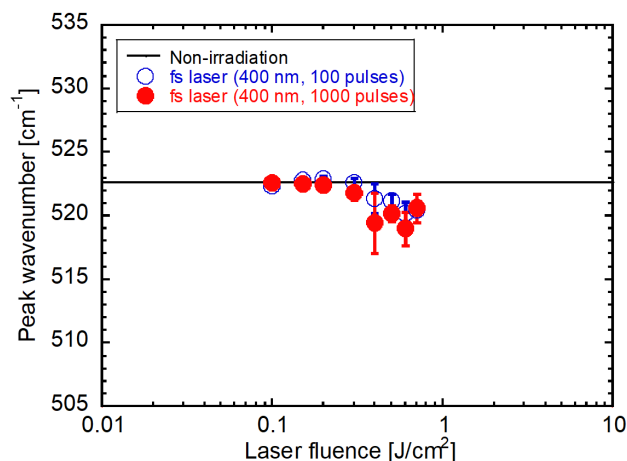


Fig. 9. Dependence of peak wavenumber on laser fluence for silicon solar cell.

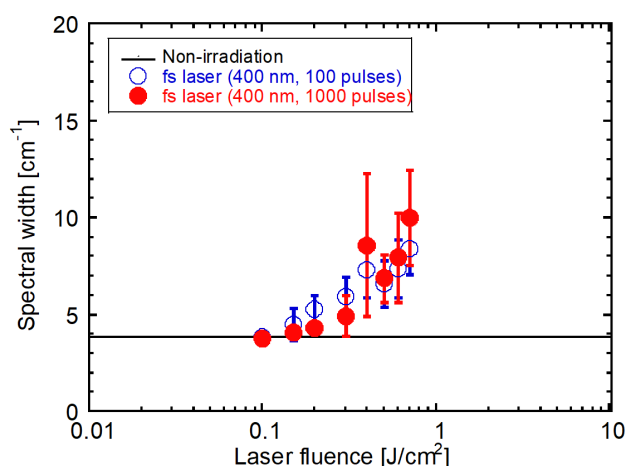


Fig. 10. Dependence of spectral width on laser fluence for silicon solar cell.

応力が加わり始めることが分かった。また、スペクトル幅のレーザフルエンス依存性（結晶性の評価）を Fig.10 に示す。アブレーション閾値 0.10 J/cm^2 以上のフルエンスで結晶性が低下し始めることが分かった。

以上のことから結晶格子の歪みおよび結晶性についてはパルス数に関係なく、レーザフルエンスに依存することが分かった。紫外フェムト秒レーザで結晶格子の歪みがなく、結晶性を保持した状態でシリコン太陽電池にナノ周期構造を形成するにはアブレーション閾値 0.10 J/cm^2 に設定することが重要であることが分かった。

5. まとめ

紫外フェムト秒レーザを用いてアブレーション閾値フルエンスの1~7倍で照射されたシリコン太陽電池の表面粗さおよび結晶性を調べた。紫外フェムト秒レーザではナノ秒レーザに比べて低いフルエンス (0.10 J/cm^2) 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周期構造を形成させることに成功した。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によるナノ周期構造形成の最適条件を考察するとレーザフルエンスをアブレーション閾値 0.10 J/cm^2 に設定することが重要であることが分かった。

紫外ナノ秒レーザでは表面粗さ 23.5 nm 程度のナノ微細構造が波長 500 nm において反射率約2%の低減に寄与していた。一方、本研究で用いた紫外フェムト秒レーザでは、より大きい表面粗さ 80 nm 程度のナノ周期構造がシリコン表面に形成できた。反射率の計算では、このナノ周期構造がピラミッド構造上に形成できたと仮定し、波長 $400\sim 800 \text{ nm}$ の領域において4~8%程度低減することが期待されることを示した。

謝 辞

本研究の一部は、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）、天田財団重点研究開発助成（課題番号 AF-2018203-A3）、科学研究費補助金（基盤研究（C）

課題番号 JP16K06745）、H30-R1 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・環境新技術先端プログラム／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」、NIFS 共同研究（NIFS17KNTS053）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。

文 献

- (1) 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.101106-1-101106-3 (2010)
- (2) Y. E. B. Vidhya, and N. J. Vasa : "Enhancing light trapping and minority carrier lifetime of a-Si thin films using nanosecond laser treatment", The 18th Int. Symposium on Laser Precision Microfabrication, Technical Digest, p.154, Toyama, Japan (2017-6)
- (3) F. Sánchez, J. L. Morenza, R. Aguiar, J. C. Delgado, and M. Varela : "Whisker like structure growth on silicon exposed to ArF excimer laser irradiation", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, No.5, pp.620-622 (1996)
- (4) K. Sugioka : "Manipulated Processing Using Ultrafast Lasers", *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.94, No.5, pp.248-252 (2018) (in Japanese)
杉岡幸次 : 「ビームマニピュレーションによる超短パルスレーザープロセッシング」, プラズマ・核融合学誌, Vol.94, No.5, pp.248-252 (2018)
- (5) M. Ishino : "Picosecond Soft X-Ray Laser Ablation", *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.94, No.5, pp.257-260 (2018) (in Japanese)
石野雅彦 : 「ピコ秒軟 X 線レーザーアブレーション」, プラズマ・核融合学誌, Vol.94, No.5, pp.257-260 (2018)
- (6) M. Birnbaum : "Semiconductor Surface Damage Produced by Ruby Lasers", *J. Appl. Phys.*, Vol.36, pp.3688-3689 (1965)
- (7) D. C. Emmony, R. P. Howson, and L. J. Willis : "Laser mirror damage in germanium at $10.6 \mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.23, No.11, pp.598-600 (1973)
- (8) S. R. J. Brueck and D. J. Ehrlich : "Stimulated Surface-Plasma-Wave Scattering and Growth of a Periodic Structure in Laser-Photodeposited Metal Films", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.48, No.24, pp.1678-1681 (1982)
- (9) J. F. Young, J. E. Sipe, J. S. Preston, and H. van Driel : "Laser-induced periodic surface damage and radiation remnants", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.41, No.3, pp.261-264 (1982)
- (10) J. F. Young, J. E. Sipe, and H. M. van Driel : "Laser-induced periodic surface structure. III. Fluence regimes, the role of feedback, and details of the induced topography in germanium", *Phys. Rev. B*, Vol.30, No.4, pp.2001-2015 (1984)
- (11) A. J. Pedraza, Y. F. Guan, J. D. Fowlkes, and D. A. Smith : "Nanostructures produced by ultraviolet laser irradiation of silicon. I. Rippled structures", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.22, No.6, pp.2823-2835 (2004)
- (12) Y. Izawa, S. Tokita, M. Hashida, M. Fujita, and Y. Izawa : "Ultra-Fast Interaction between Femtosecond Laser and Single-Crystalline Silicon", *Rev. Laser Eng.*, Vol.34, No.11, pp.773-778 (2006) (in Japanese)
井澤友策・時田茂樹・橋田昌樹・藤田雅之・井澤靖和 : 「フェムト秒レーザと単結晶 Si の超高速相互作用」, レーザ研究, Vol.34, No.11, pp.773-778 (2006)
- (13) S. Watanabe, Y. Yoshida, S. Yatsu, M. Kawai, and T. Kato : "In situ observation of self-organizing nanodot formation under nanosecond-pulsed laser irradiation on Si surface", *J. Appl. Phys.*, Vol.108, pp.103510-1-103510-5 (2010)
- (14) J. Bonse, J. Krüger, S. Höhm, and A. Rosenfeld : "Femtosecond laser-induced periodic surface structures", *J. Laser Appl.*, Vol.24, No.4, pp.0420061-7 (2012)
- (15) M. Shimizu, M. Hashida, Y. Miyasaka, S. Tokita, and S. Sakabe : "Unidirectionally oriented nanocracks on metal surfaces irradiated by low-fluence femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.103, pp.174106-1-174106-4 (2013)
- (16) C. P. Gonschior, K. -F. Klein, T. Sun, and K. T. V. Grattan : "Generation of periodic surface structures on silica fiber surfaces using 405 nm CW diode lasers", *J. Non-Crystalline Sol.*, Vol.361, pp.106-110 (2013)

- (17) M. Hashida, L. Gemini, T. Nishii, Y. Miyasaka, H. Sakagami, M. Shimizu, S. Inoue, J. Limpouch, T. Mocek, and S. Sakabe : "periodic Grating Structures on Metal Self-organized by Double-pulse Irradiation", *J. Laser Micro/Nanoeng.*, Vol.9, No.3, pp.234-237 (2014)
- (18) M. Hashida, Y. Miyasaka, M. Shimizu, H. Sakagami, S. Inoue, and S. Sakabe : "Periodic Surface Structures Self-Organized on Solid Materials Ablated by Femtosecond Laser Pulses", *Rev. Laser Eng.*, Vol.43, No.11, pp.745-751 (2015) (in Japanese)
橋田昌樹・宮坂泰弘・清水雅弘・坂上仁志・井上峻介・阪部周二 : 「フェムト秒レーザーアブレーションにより固体表面に自己組織的に形成するナノ周期構造」, レーザー研究, Vol.43, No.11, pp.745-751 (2015)
- (19) L. Gemini, M. Hashida, Y. Miyasaka, S. Inoue, J. Limpouch, T. Mocek, and S. Sakabe : "Periodic Surface structures on titanium self-organized upon double femtosecond pulse exposures", *Appl. Surf. Sci.*, Vol.336, pp.349-353 (2015)
- (20) M. Hashida : "Nano Ablation of Materials Interacted with Femtosecond Laser Pulses", *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.94, No.5, pp.244-247 (2018) (in Japanese)
橋田昌樹 : 「フェムト秒レーザーによる材料のナノアブレーション」, ブラズマ・核融合学誌, Vol.94, No.5, pp.244-247 (2018)
- (21) Y. Shimotsuma : "Advanced Functionality of Glass Processed by Femtosecond Laser Pulse", *J. Plasma Fusion Res.*, Vol.94, No.5, pp.253-256 (2018) (in Japanese)
下間靖彦 : 「フェムト秒レーザーによるガラスへの機能性付加工」, ブラズマ・核融合学誌, Vol.94, No.5, pp.253-256 (2018)
- (22) F. Fraggelakis, G. Mincuzzi, J. Lopez, I. Manek-Hönniger, and R. Kling : "Controlling 2D laser nano structuring over large area with double femtosecond pulses", *Appl. Surf. Sci.*, Vol.470, pp.677-686 (2019)
- (23) Y. Miyasaka, M. Hashida, Y. Ikuta, K. Otani, S. Tokita, and S. Sakabe : *Phys. Rev. B*, Vol.86, pp.075431-1-075431-5 (2012)
- (24) F. Nigo, M. Hashida, S. Sakabe, and M. Kusaba : "Periodic Surface Nano-Structures on Silicon Solar Cells Produced by Non-Thermal Laser Processing", *Rev. Laser Eng.*, Vol.47, No.3, pp.160-163 (2019) (in Japanese)
児子史崇・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)
- (25) F. Nigo, M. Hashida, M. Tsukamoto, S. Sakabe, and M. Kusaba : "Reflectance and crystallinity of silicon solar cells with LIPSS produced by XeCl excimer laser pulses", Abstract of The 15th Int. Conf. on Laser Ablation, p.109, Maui-Hawaii, USA (2019-9)
- (26) Y. F. Guan, A. J. Pedraza, J. D. Fowlkes, and D. A. Joy : "Nanostructures produced by ultraviolet laser irradiation of silicon. II. Nanoprotrusions and nanoparticles", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.22, No.6, pp.2836-2843 (2004)
- (27) C. H. Crouch, J. E. Carey, J. M. Warrender, M. J. Aziz, and E. Mazur : "Comparison of structure and properties of femtosecond and nanosecond laser-structured silicon", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.84, No.11, pp.1850-1852 (2004)
- (28) M. Halbwax, T. Sarnet, Ph. Delaporte, M. Sentis, H. Etienne, F. Torregrosa, V. Vervisch, I. Perichaud, and S. Martinuzzi : "Micro and nano-structuration of silicon by femtosecond laser: Application to silicon photovoltaic cells fabrication", *Thin Solid Films*, Vol.516, pp.6791-6795 (2008)
- (29) H. M. Branz, V. E. Yost, S. Ward, K. M. Jones, B. To, and P. Stradins : "Nanostructured black silicon and the optical reflectance of graded-density surface", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.94, p.231121 (2009)
- (30) A. J. Bett, J. Eisenlohr, O. Höhn, P. Repo, H. Savin, B. Bläsi, and J. C. Goldschmidt : "Wave optical simulation of the light trapping properties of black silicon surface textures", *Opt. Exp.*, Vol.24, No.6, pp.A434-445 (2016)
- (31) J. Zi, H. Buscher, C. Falter, W. Ludwig, K. Zhang, and X. Xie : "Raman shifts in Si nanocrystals", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, No.2, pp.200-202 (1996)



児子史崇 (学生員) 2018年3月大阪産業大学工学部電子情報通信工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科電子情報通信工学専攻博士前期課程在学中。レーザー学会会員。



橋田昌樹 (正員) 1996年3月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年(財)レーザー技術総合研究所入所。1999~2000年フランス・サクレ原子力研究所研究員。2003年京都大学化学研究所助手, 2006年同助教授。原子分子衝突物理, レーザー同位体分離, 半導体励起固体レーザー開発, 高強度短パルスレーザー装置開発とその応用に関する研究に従事。博士(工学)。2004年レーザー学会業績賞受賞。



塚本雅裕 (非会員) 1994年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月日本学術振興会特別研究員, 同年11月より大阪大学溶接工学研究所(現, 接合科学研究所)助手。1996~1998年日本学術振興会海外特別研究員, 米国ローレンスリバモア国立研究所客員研究員。2006年8月大阪大学接合科学研究所講師, 2012年2月同准教授, 2017年4月同教授。博士(工学)。内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発(2014~2018年度)」研究開発責任者(プロジェクトリーダー)。現在, NEDO プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発(2016~2020年度)」にて高輝度青色半導体レーザー光源技術開発を推進中。レーザープラットフォーム協議会会長, レーザ加工学会理事および編集委員長, 溶接学会高エネルギービーム加工研究委員会委員長, スマートプロセス学会理事および編集委員会委員。レーザー学会上級会員, 応用物理学会員。



阪部周二 (非会員) 1978年大阪大学工学部電気工学科卒業。1980年同大学大学院修士課程電気工学専攻修了。1982年大阪大学レーザー核融合研究センター助手。1985年西ドイツ・マックスプランク量子光学研究所研究員。1989年大阪大学大学院工学研究科助手, 1996年同助教授を経て, 2003年より京都大学教授(化学研究所先端ビームナノ科学センター)。2009~2010, 2017~2018年先端ビームナノ科学センター長。2020年京都大学名誉教授。この間, 1997~1998年文部省核融合科学研究所客員助教授, 2002年ウィーン工科大学客員教授, 2007~2015年光産業創成大学院大学客員教授。レーザープラズマ物理, X線駆動爆縮核融合の研究, 核融合用大出力レーザー装置の建設, レーザー同位体分離原子衝突物理(特に電荷移行衝突断面積の測定とデータベースの編纂)などに従事後, 京都大学では高強度極短パルスレーザーと物質との相互作用の物理とその応用の研究に従事。工学博士。レーザー学会理事・副会長。OPI協議会理事。OPIC組織委員長。レーザー学会フェロー, 日本物理学会, 日本応用物理学会会員。



草場光博 (正員) 1989年近畿大学理工学部原子炉工学科卒業。1994年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程電磁エネルギー工学専攻修了。現在, 大阪産業大学教授。レーザーによる群分離の研究, レーザプロセッシング, 有機分子の赤外分光の研究などに従事。博士(工学)。電気学会光応用・視覚技術委員会委員長。日本化学会, 応用物理学会, 日本原子力学会, 日本分光学会, レーザー学会会員。