

ダブルパルス紫外レーザーを用いた非熱的超微細加工システム構築

Construction of non-thermal ultra-fine processing using double-pulse UV lasers

草場 光博（Kusaba Mitsuhiro）

1. はじめに

現在、IoT/AI による超スマート社会に向けた高性能かつ精密な電子デバイス開発が行われており、同時にレーザー加工技術もより精密な超微細加工の確立とそれによる半導体材料の濡れ性付与が要求されている。半導体材料への濡れ性付与は、材料の機械的衝撃や熱による物理化学的性質を損なわず、容易に微小領域の加工ができる方法の開発が必要不可欠である。そこで今までに解明してきたナノ秒紫外レーザーによる半導体材料表面への非熱的微細構造形成の結果を基に、超解像顕微鏡で利用されているコヒーレント相互作用技術を利用し、2 台のナノ秒紫外レーザー（エキシマレーザー）を組み合わせた超微細加工システムを構築し、従来のレーザー加工では達成できていない回折限界を超えた 10 nm 程度の超微細加工を目指す。2023 年度は 2022 年度に構築した KrF エキシマレーザー加工システムを用いてシリコン太陽電池の融解閾値を測定し、融解閾値以下のレーザーフルエンスで照射することでナノ微細構造が形成されることが分かったので報告する。

2. シリコン太陽電池の融解閾値測定

昨年度構築した発振波長 248 nm、パルス幅 20 ns の KrF エキシマレーザー（COMPex 102、Lambda Physik）を光源とした加工システムを用い、シリコン太陽電池に照射した。偏光プリズムと $\lambda/2$ 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、レーザーフルエンスを制御した後、スペイシャルフィルターを用いてビーム形状をガウシアン形状に整形し、 $f = 100$ mm のレンズでシリコン太陽電池表面に集光照射した。シリコン太陽

電池表面に照射されるレーザーの偏光は直線偏光であり、その直径は水平方向が $162\ \mu\text{m}$ (FWe^{-1}M)と垂直方向が $163\ \mu\text{m}$ (FWe^{-1}M)であった。半導体レーザーを用いて KrF エキシマレーザーの照射位置が確認できるようにした。レーザーエネルギーは $1\ \mu\text{J} \sim 300\ \mu\text{J}$ の間で変化させ、照射レーザーフルエンスを調整し、照射回数は 5, 10, 15 パルスで行った。エネルギー安定度は約 14%であった。シリコン太陽電池の表面はピラミッド構造がある

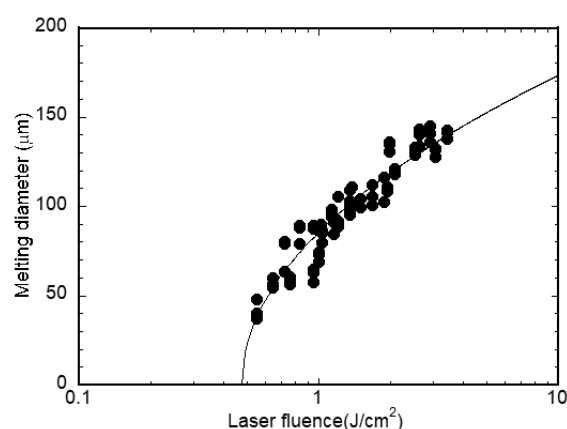


図1 融解径のレーザーフルエンス依存性

ため、入射角度は 45° から 54° になる。レーザー照射後の太陽電池表面に形成された照射痕は、レーザー顕微鏡 (LEXT 4500、Olympus) で観察した。融解径は照射痕の融解している領域の大きさとして評価した。図 1 は融解径のレーザーフルエンス依存性を示す。黒丸 (●) は測定値、実線はレーザーのビーム形状がガウシアン形状の場合、融解径は照射レーザーフルエンスに依存することから求めたフッティング曲線である。この曲線から融解閾値フルエンスは 0.47 J/cm^2 であることが分かった。

3. ナノドット構造の形成

シリコン太陽電池表面にナノ微細構造を形成させるために、融解閾値近傍以下のレーザーフルエンス $F=0.23 \sim 0.48 \text{ J/cm}^2$ で KrF エキシマレーザーを照射した。レーザーは $f=150 \text{ mm}$ のシリンDRカルレンズを用い、太陽電池表面上の照射サイズは水平方向 0.6 cm 、垂直方向 $293 \mu\text{m}$ (FWHM) であった。照射パルス数が 1500 パルスになるように掃引速度を調整した。照射後のシリコン太陽電池の表面を電界放出型走査電子顕微鏡 (S4700、

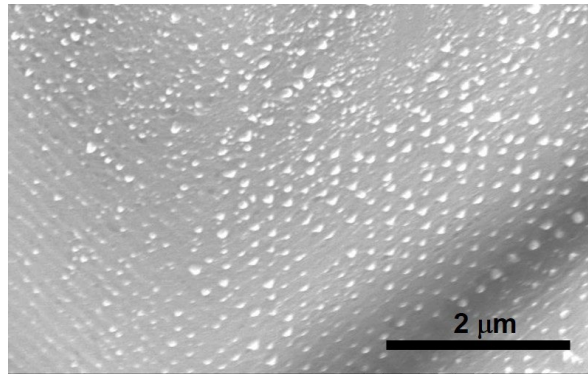


図 2 レーザーフルエンス 0.35 J/cm^2 で照射後のシリコン太陽電池表面の SEM 像

Hitachi) で観察した。図 2 にレーザーフルエンス 0.35 J/cm^2 で照射した時の SEM 像を示す。シリコン太陽電池のピラミッド構造の S 偏光面 (レーザーが S 偏光で入射する面) にレーザー波長程度 (248 nm) の間隔で大きさ $60 \text{ nm} \sim 120 \text{ nm}$ の三角形のナノドット構造が形成されることが分かった。また図 2 以外のレーザーフルエンスでもナノドット構造が形成されることが分かった。従来、融解閾値近傍以下のレーザーフルエンスで照射するとナノ微細構造が形成されることが知られているが、今回の結果は融解閾値の半分程度でもナノドット構造が形成されており、融解閾値以下のレーザーフルエンス領域に未知のナノ微細構造形成メカニズムが存在していると考えられる。ナノドット構造を形成したシリコン太陽電池の反射スペクトルを測定したところ、 500 nm での反射率が 5% となり、照射前の値の $1/3$ 以下になることが分かった。ナノドット構造がピラミッド構造の S 偏光面に形成されていることから、例えば太陽電池を 90° 回転させて照射することでピラミッド構造全面にナノドット構造を形成させることで、無反射のシリコン太陽電池を作製することが出来ると考えている。また、結晶性を顕微ラマン分光装置で評価したところ、結晶性は照射前の状態をほぼ保持しつつ、表面には圧縮応力が生じていることが分かり、シリコン太陽電池のバンドギャップエネルギーが高エネルギー側にシフトしていることを示唆しているものと考えられる。