

なぜM²が問題になるのか

ラジェシュ・パテル、ジェームス・ロバチェック

優れたビーム品質はロバストなレーザスクライビングを意味する。

近年、米国では地球温暖化と海外エネルギー依存に対する懸念が増大し、風力や太陽光などの代替エネルギー源が大きな関心を集めている。ベル研究所が1954年に「太陽電池」を発明したとき、ソーラ技術は将来の電力になると歓迎された。ソーラが化石燃料との対比で受け入れられたのは、その低平準化コスト(LCOE)にあった。結晶シリコン(c-Si)系フラットパネル太陽光発電(PV)モジュールが最初に商業化されて世界各地に配置されたが、薄膜PV(TFPV)ソーラパネルも大きな歩幅で動き出し、太陽光エネルギーの広範囲な普及を推進している。

フラットパネルPVモジュールの生産では、レーザがさまざまな材料の切断、穴あけ、スクライビングおよびアニーリングに使われている。とくにTFPVの生産では、Qスイッチ半導体励起固体(DPSS)レーザが広く使用され、薄膜層を除去(レーザスクライビング)して、太陽電池にモノリシック集積された直列接続の一部を電気的に絶縁している。この加工は薄膜層を支えるガラスパネルに強く集光したレーザビームを照射して、薄膜材料またはガラスパネル自体から1層以上の薄膜を除去する。最近は低コスト化と小型化が進んだパルスファイバーレーザが登場し、レーザスクライビングの次世代方式になろうとしている。しかしながら、ファイバーレーザはビーム品質が低い(M²値が高い)ため、この分野では採用が遅

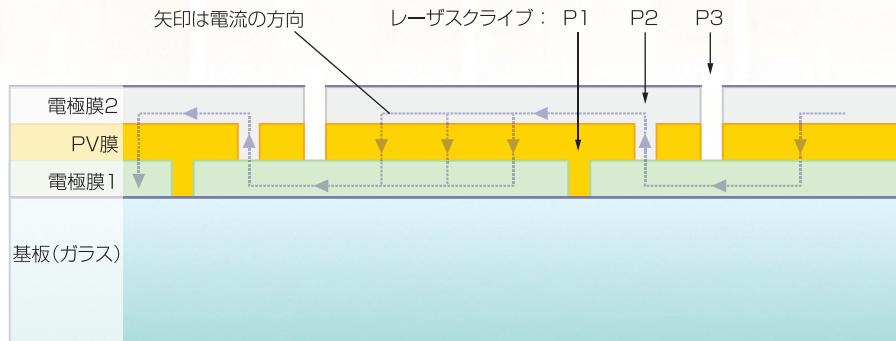


図1 薄膜太陽電池の基本的な幾何学配置と機能の概念図を示している。

れている。ビーム品質が低いと、スクライビングの品質が悪くなり、その結果、歩留りが低下し、投資利益率が低くなる。最近の開発はファイバーレーザのビーム品質の改善をもたらしているが、良好なビーム品質、低いコスト、小さなサイズのすべてが同時に実現されるかどうかは検証の必要がある。

薄膜光起電力太陽電池

標準的な薄膜太陽電池は大型ガラス基板に蒸着された透明導電性酸化物(TCO)層、中間の半導体光起電力層、金属薄膜層の3層から構成される。図1は代表的なTFPVデバイスの断面構造を図解している。薄膜太陽電池用の半導体材料には、硫化カドミウム/テルル化カドミウム(CdS/CdTe)、二セレン化銅インジウムガリウム(CIGS)またはa-Siと微結晶Si(μ c-Si)の複合層などがある。

CIGS TFPVデバイスの金属層はガラス基板上にあるが、金属層の直下には半

導体層がある。他方、CdS/CdTe、a-Si、 μ c-SiなどのTFPVデバイスの金属層は半導体層の上にある。一般に、TCO材料はインジウムスズ酸化物(ITO)、酸化スズ(SnO₂)および酸化亜鉛(ZnO)が使用され、金属層はアルミニウム(Al)、金(Au)、銅(Cu)およびモリブデン(Mo)が使われる。太陽電池の基板材料は数mm厚のソーダ石灰ガラス板および10~100μm厚の高分子膜と金属膜が使われる。

多層構造は、2枚の導体「電極」表面(太陽に向く「前面」電極および「背面」電極)とその間の太陽光吸収層としての半導体(PV)材料からなる。前面の電極は太陽光と電力が最小の損失で伝搬するITOやSnO₂などのTCO材料が使われる。

TFPVデバイスの生産では、一般に3回のスクライビング加工(P1、P2およびP3スクライブと呼ばれることが多い)が行われ、その間には各種薄膜の蒸着工程がある。P1スクライブはガラス基

板上の第1電極を除去し、P2スクライブは第1電極膜上の太陽光吸収膜を除去する。また、P3スクライブは第1電極膜上の太陽光吸収層と第2電極膜の両方を除去する。これらのスクライブを行うと、メートル規模の大型ソーラパネルはいくつかの狭いPVセルに分割され、それらの電気的動作は直列になる。このようにして、実用性と効率性に優れた低電流で高電流のデバイスが作製される。

ビーム品質の影響

DPSS Qスイッチレーザを搭載した様々なレーザ装置が薄膜スクライビング用に採用されているが⁶、1064nmと532nmの波長をもつレーザが広く使われている。最近はさらに低成本、小型のファイバーレーザが登場し、レーザスクライビング用の次世代装置として提案されている。DPSS レーザとファイバーレーザは、いずれも短パルスと可変の繰返し速度を得られるが、両者のレーザ装置の大きな違いはビーム品質、つまり M^2 因子にある。 M^2 因子は基本的に、理論上の正規分布からのレーザビームの偏差を表している。理路上のガウスビームは $M^2=1$ となり、実際のレーザビームは $M^2>1$ になる。標準のDPSS レーザ装置は優れた TEM₀₀ ビームプロファイルと 1.2 以下のビーム品質 M^2 を備えている。代表的な第一世代のパルスファイバーレーザの M^2 値は 1.8 以上で、 $M^2=4$ の大きな値の場合もあった⁽¹⁾。パルス

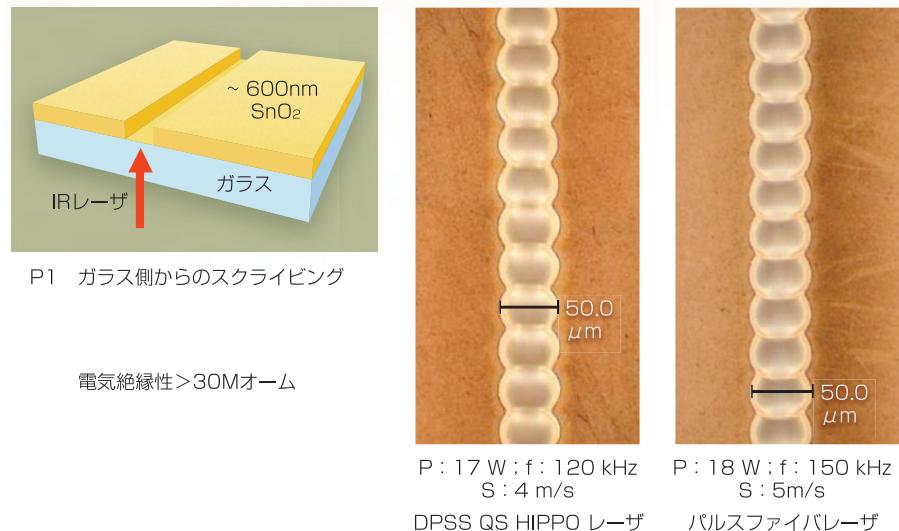


図2 DPSS Qスイッチレーザとパルスファイバーレーザを用いて実現された SnO_2 材料の典型的なスクライブを示している。

ファイバーレーザのビーム品質は新しい世代ほど改善されている。しかしながら、優れたビーム品質、低いコスト、小型サイズのすべてを同じ装置で満足させることは難しいようだ。

TFPV のスクライビング加工の多くは、標的とする(多)層膜の基板の裏側からレーザビームを入射する。したがって、基板のすべての収差がレーザビームの強い集束に影響を及ぼし、加工点のビーム強度とスクライブの究極の品質はいずれも劣化してしまう。TFPV パネルの大型化と基板サイズの拡大、さらには基板の低成本化の進展とともに、ガラスの品質と平坦性は低下している。その結果、ガラス基板の平坦性、板厚、表面粗さなどの影響の少ないロバスト性を有した高い歩留り

のスクライブ加工を保証するには、ビーム品質の重要性がさらに高くなる。また、スループットの増加とコストの低減を実現するには、レーザのスクライブ線幅をさらに狭くして電池の加工効率を改善し、スクライブ品質を高くして優れた電気的絶縁性を確保しなければならない。

パルス幅が短く、ピークパワーが高いほど、熱影響層(HAZ)の発生、材料の再錆込み、基板の微小亀裂などの望ましくない HAZ は減少することが知られている。われわれはロバストな TFPV スクライビング用のレーザ装置の選択では、ビーム品質も重要な要因になることを明らかにした。

図2はDPSS レーザとファイバーレーザを用いた SnO_2 材料のレーザスクライブ

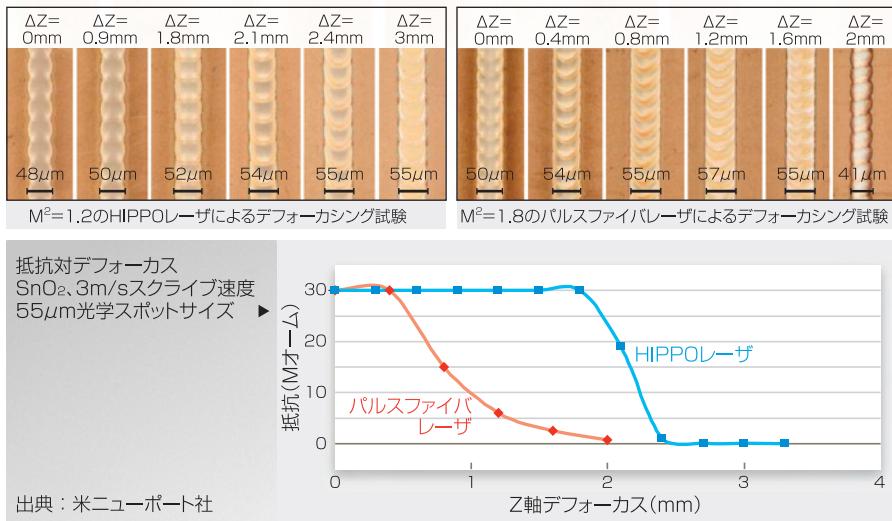


図3 焦点位置を変えたときのスクライブと測定された電気絶縁抵抗を示している。

を比較して示している。DPSS レーザによるスクライブでは、スペクトラ・フィジクスの出力パワー 17W、繰返し速度 50 kHz、パルス持続時間 15ns、 $M^2=1.2$ の DPSS HIPPO レーザが使用され、ファイバーレーザによるスクライブでは 20W、15ns、 $M^2=1.8$ のパルスファイバーレーザが使用された。レーザビームはガラス基板の裏側から入射し、ガラスと SnO₂ の界面に集光された。いずれのレーザも P1 スクライブは適切に行われ、良好な電気絶縁性が得られたと思われる。

異なる M^2 因子が被写界深度 (DOF) に及ぼす影響を調べる実験も行われた。DPSS レーザは $M^2=1.2$ の低い値をもつため、スポットサイズが 50 μm の場合、理論上の DOF はパルスファイバーレーザの約 1.5 倍となり、絶対値ではパルスファイバーレーザの 1025 μm に対して DPSS

レーザは 1542 μm になる。スクライブ品質に及ぼすガラス基板の厚みと平坦性の影響を実験的に調べるために、それぞれのレーザの焦点位置をビーム伝搬軸に沿って変えるスクライブが行われた。スクライブの電気絶縁性を測定し、それぞれのスクライブの機能品質を評価した。図3に示すように、実験の結果からは、レーザ装置の M^2 因子が低いほど、長い焦点距離にわたって良好な品質のスクライブが得られることが明瞭に示されている。したがって、より

低い M^2 ビーム値をもつ装置を用いると、ガラス基板の厚み、平坦性、表面粗さなどの変化に対する許容範囲が広くなり、ロバスト性に優れたレーザスクライビング加工を行うことができる。

まとめ

コスト面での優位性によって、薄膜ソーラパネルは、代替エネルギーにおける市場シェアを広げていくと期待されている。こうした薄膜太陽電池の生産において、レーザ装置は重要な役割を果たすであろう。レーザを用いて薄膜層をスクライブしたデバイスは、基本的に、導電層と半導体層の「彫刻」が行われる。高歩留りのロバストな加工を行うには、正しいレーザ装置の選択が重要になる。本稿に記述した研究は、優れたビーム品質、つまり低い M^2 値をもつレーザ装置を選択すると、焦点深度が深くなり、ガラス基板の厚さが変化しても、高歩留りの精密微細加工が可能になることを明確に示している。ビーム品質が良いほどスクライブ加工はロバストで高品質になり、全体の加工効率が向上し、究極的な全体システムの生産コスト低減を実現できる。

参考文献

- (1) T. Hoult and J. Gabzdyl, "Fiber lasers in the photovoltaic industry", Industrial Laser Solutions, 24, 11, 2008, pp.18-20.

著者紹介

ラジェシュ・パテル (Dr. Rajesh Patel, raj.patel@newport.com) は米ニューポート社 (Newport Corporation, www.newport.com) スペクトラ・フィジックス事業部 (Spectra-Physics) の応用研究所のシニアマネージャ、ジェームス・ロバチエク (James Bovatsek) は同研究所のアプリケーションエンジニア。