

論文の内容の要旨

論文題目 多接合タンデム太陽電池の電気特性の
評価解析法に関する研究

氏 名 小倉 暁雄

本研究では、単接合太陽電池の限界効率を大きく超える多接合タンデム太陽電池の特性を評価するための新たな実験・計算手法について検討を行った。近年、III-V系化合物太陽電池を利用した多接合タンデム太陽電池に注目が集まっている。化合物太陽電池材料は、組成比を調節することでバンドギャップを制御することができる。これを利用して、異なるバンドギャップを持つ太陽電池を多層化し、単接合セルでは熱や透過損失となっていた太陽光エネルギーをより効率よく吸収できるようになる。バンドギャップを最適化した3接合タンデム太陽電池では、最大集光下において理論変換効率は60%以上に達する。多接合タンデム太陽電池の特性は、構成されるサブセルの電気特性に依存してしまうため、接合数に関係なく各サブセルの最適化が必要不可欠である。その最適化のために、これまでも各サブセルの評価・解析方が提案され、代表的なものがSuns-Voc法とエレクトロ・ルミネッセンス(EL)法がある。しかしこれらの方法は、他のサブセルからの影響を考慮していないため、抽出できるパラメータに限りがあることから、改善の余地が残されていた。そこで本研究では、従来の方法よりも優れた評価・解析手法を確立するための研究を行った。

各サブセルの電気特性を抽出するためにスペクトル感度-電圧測定(SR-V)を行う。この測定方法は、従来より用いられてきた各サブセルのスペクトル感度測定(外部量子効率:EQE)と似ている。SR-V測定では、単色光の波長は固定し、外部バイアス電圧を変化させて電流を計測する。この測定を、3接合タンデム太陽電池であれば計3回行って、全てのサブセルのSR-V特性を取得する。

次に、取得したSR-V特性に対してカーブフィッティングを行い、電気特性を抽出する。カーブフィッティングには非線形最小二乗法の一つである「PowellのHybrid法」を用いた。カーブフィッティングを行う際の最も重要な点は、自己無撞着な計算によってフィッティングを行うことである。SR-V法によって各サブセル特性を得ることはできるが、それでも対象とするセル以外の影響は少なからず存在するため、ターゲットとするサブセルの純粋な特性とはならない。そこで自己無撞着に計算を行い、各サブセル間の影響を考慮しながらデータ抽出を行うことにより、高精度でデータ抽出を行えるようにした。

実験データへのフィッティングを行う前に、まずフィッティングのプログラムコードが正しく動作することを検証した。検証には2接合Ga(In)As/Geセルのパラメータを想定し、

シミュレーションソフト LTspice 上で各種ダイオードパラメータを設定して計算された SR-V データにフィッティングをかけた。フィッティングを開始した後、設定された真値へ収束するかを確認したところ、全てのパラメータにおいて真値へ向かって収束していくことを確認した。そのプログラムコードを用いて、実験で得られた 2 接合 Ga(In)As/Ge セルの SR-V データへフィッティングをかけた。SR-V データは非常によく一致し、抽出された各サブセルの電気パラメータを使って暗電流 (Dark I-V) 特性と光電流 (Photo I-V) 特性のシミュレーションをしたところ、こちらも実験値とよく一致したことを確認した。

更にフィッティングの精度を高めるため、SR-V 測定をする際に使われるバイアス光を使用せず、モノクロ光のみを照射して得られる SR-V データを用いてフィッティングを行った。その結果、こちらも実験で得られる SR-V データとよく一致し、Dark I-V 特性・Photo I-V 特性をシミュレーションにより実験値を再現することができた。

以上より、従来まで使用されてきた各サブセルの評価・解析よりも、①サブセル間の影響を考慮する、②抽出するサブセルの電気パラメータの数、という点において優れた手法を確立することができた。また、多接合タンデム太陽電池の評価において通常使われるバイアス光を使用しないで得られる SR-V データに対してもフィッティングが可能であることを示すことができた。この評価・解析手法を用いることで、多接合タンデム太陽電池の素子構造や実際の作製条件にフィードバックをして、特性改善を図ることができるようになると思われる。

多接合タンデム太陽電池の評価として従来そこまで使用されてこなかった SR-V 測定法であるが、この測定法を多接合化することで起こるルミネッセンス・カップリング (LC) 現象の解析・評価することへ更に応用する。この現象は、サブセル間の生成電流の差が大きくなる場合、つまり集光をする際、顕著に現れる。もともと多接合タンデム太陽電池は集光を想定して作製しているため、この現象を詳細に解析することは有益である。

多接合タンデム太陽電池では、バンドギャップの大きいサブセル E_g^H で発光再結合によって生じたフォトンが、バンドギャップの小さいサブセル E_g^L で吸収されるという現象が起こりうる。この現象をルミネッセンス・カップリング (L-C) と呼ぶ。従来、L-C を解析的に評価するために、自己無撞着な計算をせず、更に直列抵抗・並列抵抗の影響を無視して行ってきた。そこで本研究では、フィッティングのために使用してきたプログラムコードを応用して、自己無撞着な計算を行いつつ、直列抵抗・並列抵抗の影響を考慮しながら L-C を評価した。結果、サブセル間の電流差が小さい時には並列抵抗の影響を受け、電流差が大きい時には直列抵抗の影響を受けるということが明らかになり、これまでの L-C 解析に修正が必要であることを示すことができた。更に、フィッティング時に使用した SR-V データを詳細に解析すると、L-C によって生成された電流と上層サブセルでの不完全吸収により生成された電流とを区別することができることを測定とシミュレーションの両方から示すことができた。最後に L-C を考慮した際、集光時の変換効率にどのような影響があるかをシミュレーションによる検証を行った。結果、通常の 1sun ではそこまで大きな変化が見ら

れなかったが、1000 倍に集光した場合は L-C の効果が顕著になり、より変換効率の向上が見られた。