

# 透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池の研究開発を加速するデバイスシミュレーション技術

Device Simulation Technology Accelerating Transparent Cu<sub>2</sub>O Solar Cell R&D

## Cu<sub>2</sub>O太陽電池の特性を再現可能なデバイスモデルの構築により、高い変換効率を実現する最適構造を導出

自動車や電車などモビリティの電動化を実現するキーデバイスとして、太陽電池が注目されています。様々な機関が各種太陽電池開発を進める中、東芝は、コストと性能の両立が期待できる、亜酸化銅(Cu<sub>2</sub>O)をトップセルに用いたタンデム型太陽電池の研究開発を進めています。Cu<sub>2</sub>O太陽電池は積層構造であり、各層及び層界面の特性や太陽電池構造を適正化できれば高いエネルギー変換効率(以下、変換効率と略記)を実現できます。Cu<sub>2</sub>O太陽電池の性能向上に向け、実験値の再現及び設計やプロセスの改善指針を提示可能なシミュレーション技術を開発し、その結果から得た指針を試作に反映して、世界最高<sup>(注1)</sup>の変換効率9.5%を実現しました。

### Cu<sub>2</sub>O太陽電池の背景と課題

現在普及しているシリコン(Si)太陽電池の変換効率は理論効率に近い26.8%に達しています<sup>(1)</sup>。一方、自動車など設置面積が限定される用途では、更なる高効率が求められており、その解決策の一つとしてタンデム型太陽電池が検討されています。しかし、高効率なIII-V族半導体タンデム型太陽電池の製造コストはSi太陽電池と比較して数百倍以上と高く、自動車への搭載は困難です。そこで、東芝は、Si太陽電池の受光面上に透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池を搭載したタンデム型で、高効率と低コストの両立が期待できる太陽電池を開発しています<sup>(2)</sup>。

この太陽電池を自動車向けに実用化するには、Cu<sub>2</sub>O太陽電池とSi太陽電池の変換効率を合わせて30%台にする必要があるため、Cu<sub>2</sub>O太陽電池単体には試算上10%以上の変換効率が求められます。Cu<sub>2</sub>O太陽電池(セル)は、**図1**に示すように積層構造であり、変換効率の向上には各層及び界面の特性やセル構造そのものを適正化する必要があります。実験と分析だけによる研究開発では最適構造の導出が困難であるため、Cu<sub>2</sub>O太陽電池の特性を高精度に再現可能なデバイスモデルを構築し、最適構造をシミュレーション可能にすることが課題でした。

(注1) 2023年6月現在、透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池として、当社調べ。

### Cu<sub>2</sub>O太陽電池のモデル構築と改善指針の提示

シミュレーション結果を改善指針に反映するには、精度が高いデバイスモデルの構築と、実現可能性があるパラメータの提示が必要です。これまで、Cu<sub>2</sub>O太陽電池の1次元デバイスシミュレーションに関する論文が、幾つか報告されてきましたが、これらの文献値を用いたシミュレーションでは、当社太陽電池の特性を再現できませんでした。そこで、まずデバイスモデルの高精度化から取り組みました。

**図2**に、電流電圧特性について、デバイスモデルを用いて解析した高精度化前後の計算値と、開発した太陽電池の実測値の比較を示します。実測値と比較して、高精度化前の計算値は電流密度が低く、電流電圧特性がキック(特性カーブのよじれ)を示しています。これらを解決するために、太陽電池の動作原理に基づき、重要パラメータを抽出して太陽電池特性との定量的な相関を明確化しました。また、膜厚の変化による特性変動の解析から、セル各層のバンドダイアグラム(膜厚方向のエネルギー準位を描出したもの)の再現性に課題があることを明らかにし、Cu<sub>2</sub>O層の表面に層全体より正孔濃度が一桁高いp<sup>+</sup>(アクセプター性欠陥の多いp型半導体)層が形成されていることを突き止めました。これらの結果、**図2**のように実測値を高精度に再現可能なモデルを構築できました。

開発したデバイスモデルを用いて目標となる変換効率

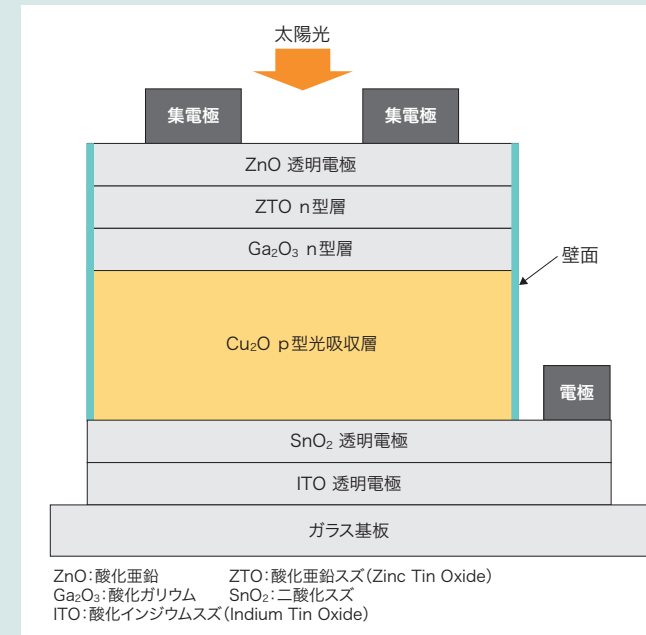


図1. Cu<sub>2</sub>O太陽電池(セル)の基本構造

Cu<sub>2</sub>O太陽電池は積層構造から成ります。高効率化には、最も重要な光吸収層であるCu<sub>2</sub>O層を含め、各層の物性を適正化する必要があります。

10%を達成する改善指針について実現可能性を考慮して検討した結果、Cu<sub>2</sub>O層の欠陥濃度低減と正孔濃度増加が有効であると分かりました<sup>(3)</sup>。

### 改善指針の効果検証

改善指針の一つであるCu<sub>2</sub>O層の欠陥濃度低減を可能とするプロセス条件の導出に向けて、Cu<sub>2</sub>O層内の不純物やセル壁面の欠陥に着目した検討を行いました。銅(Cu)や酸化銅(CuO)といった不純物の低減や、太陽電池サイズの3mm角から10×3mmへの拡大を適用してセルを試作し、欠陥濃度低減を実現しました。その結果、変換効率が8.4%から9.5%に改善し、世界最高値を達成できました。変換効率9.5%の透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池を同25%のSi太陽電池に積層したCu<sub>2</sub>O/Siタンデム型太陽電池の変換効率試算値は28.5%になり、Si太陽電池の最高効率26.8%を上回ります<sup>(4)</sup>。

### 今後の展望

現在、もう一つの改善指針であるCu<sub>2</sub>O層の正孔濃度増加技術の開発と合わせて、発電面積が3mm角セルの約180倍になる40mm角セルの試作を進めています。大型化によって面内の膜質ばらつきがセル特性に影響を及ぼすと想定されます。そこで今後は、面内の膜質ばらつきを反映可能な多次元シミュレーション技術を開発して、大型基板

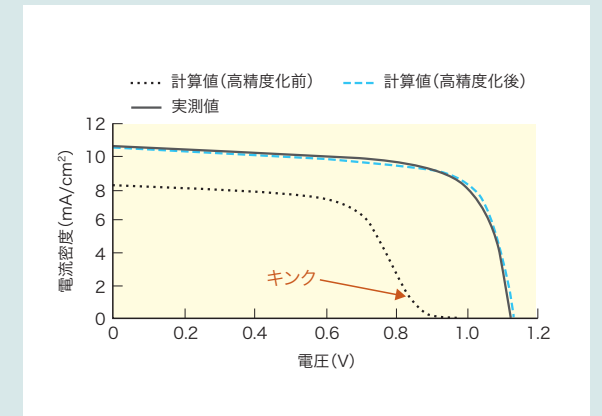


図2. 電流電圧特性の実測値とモデルから算出した計算値

高精度なモデルを構築したシミュレーション技術の開発によって、実測値を再現できることが確認できました。

を用いた研究開発を加速する予定です。Cu<sub>2</sub>O太陽電池の大型化を実現し、最終的にはSi太陽電池と同等サイズでの製造技術を確立することで、モビリティの電動化に貢献していきます。

この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

### 文献

- (1) LONGi Green Energy Technology Co., Ltd. "At 26.81 %, LONGi sets a new world record efficiency for silicon solar cells". Global News. <https://www.longi.com/en/news/propelling-the-transformation/>, (accessed 2023-06-07).
- (2) 山本和重, ほか. 透過型Cu<sub>2</sub>OとSiを積層して高効率・低コスト化に対応したタンデム太陽電池. 東芝レビュー. 2019, 74, 1, p.30-34. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2019/01/74\_01pdf/a08.pdf>, (参照 2023-06-07).
- (3) 杉本寛太, ほか. "透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池のデバイス構造モデリングと高効率化指針の探索". 第69回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集. 青山学院大学, 2022-03, 応用物理学会. 2022, 23p-E106-7. <https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jsap2022s/23p-E106-7/public/pdf?type=in>, (参照 2023-06-07).
- (4) Shibasaki, S. et al. "Development and prospects of Cu<sub>2</sub>O tandem solar cells". 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) abstract book. Nagoya, Japan, 2022-11, The Japan Photovoltaic Society. 2022, TuO-32e-01. <https://www.pvsec.org/pvsec33/index.html>, (accessed 2023-06-07).

### 杉本 寛太

生産技術センター  
製造プロセス・検査技術領域 材料・デバイスプロセス技術研究部  
博士(工学) 応用物理学会会員