

多接合タンデム太陽電池の評価・解析

新たな解析手法（SR-V 法）を開発 各サブセルの変換効率向上へ

近年、盛んに研究されてきた単接合太陽電池に代わって、III-V 族などの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。化合物太陽電池は、その組成比を調節することでバンドギャップを自由に変更することが出来る。このバンドギャップの選択制を利用して、異なるバンドギャップを持つ太陽電池の多接合化により、単接合では熱エネルギーとして失われてしまっていた太陽光エネルギーをより効率よく吸収し、単接合太陽電池で考えられてきた理論限界変換効率を上回ることが示されている。バンドギャップを最適化した 2 接合の太陽電池 ($E_{g_top}=1.65\text{eV}$, $E_{g_bottom}=0.75\text{eV}$) で、最大集光下において変換効率は 55%を超える^[1]。現在の 3 接合タンデム太陽電池では、集光下において約 42%にまで達しており、単接合太陽電池の理論変換効率を超えるものまで報告されている^[2]。

多接合タンデム太陽電池の更なる変換効率の向上には、・新素材による 4, 5 接合化 (太陽光スペクトルをより効率よく吸収)、・各サブセルの電気特性の改善 (各サブセルの変換効率向上)、などがあげられる。そこで我々は、これまで困難とされてきた各サブセルの電気特性評価に着目し、新たな手法による評価・解析を行っている。

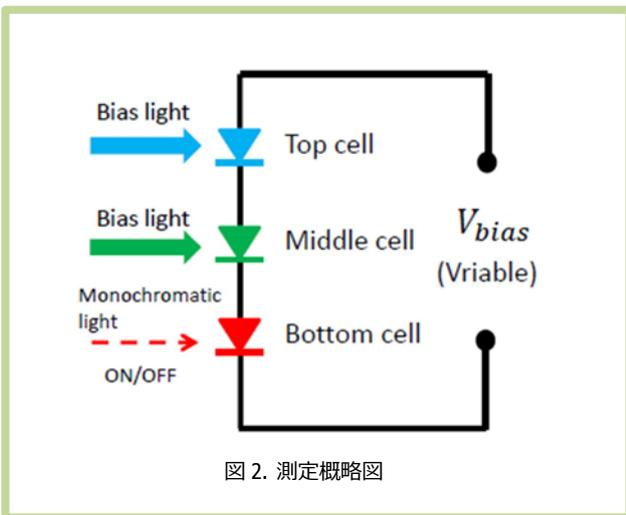
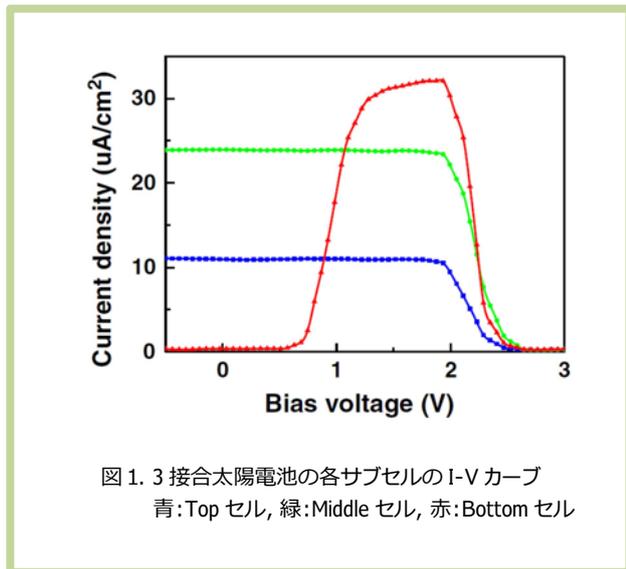
従来、単接合の太陽電池に対して行われてきた電気特性評価としては、I-V カーブの測定をした後、その結果に対してフィッティングを行い電気特性を抽出する、というものがある。我々も、この手法に近い形

式で各サブセルの電気特性評価を行うが、通常の単接合の場合と比べて、多接合の場合は特有の困難が伴う。

単接合の場合、I-V カーブの測定をすることにより、その太陽電池の特性を即座に解析することが出来る。それに対して多接合の場合、I-V カーブを測定したとしても、各サブセルの特性を得ることはできず、あくまでトータルとしての結果しか得られない。これは、+・- の電極が表面と裏面にしかないため、各サブセルを直接測定することができないためである。そこで、各サブセルの特性を直接得る手法として外部量子効率 (EQE) に着目する。この手法を多接合に適用する場合、測定したいサブセル以外に対しては光強度の高いバイアス光を照射することで、電流律速条件を測定したいサブセルに設定した状態にし、測定サブセルにモノクロ光を照射して電流を測定する。この測定であれば、各サブセル同士の僅かな影響はあるとしても、ほぼ着目したサブセルの特性を取得することができる。しかし、EQE 測定への結果に対してデータフィッティングを行うのは非常に困難であるので、この手法を更に発展させた測定結果を用いて各サブセルの電気特性の評価を行う。

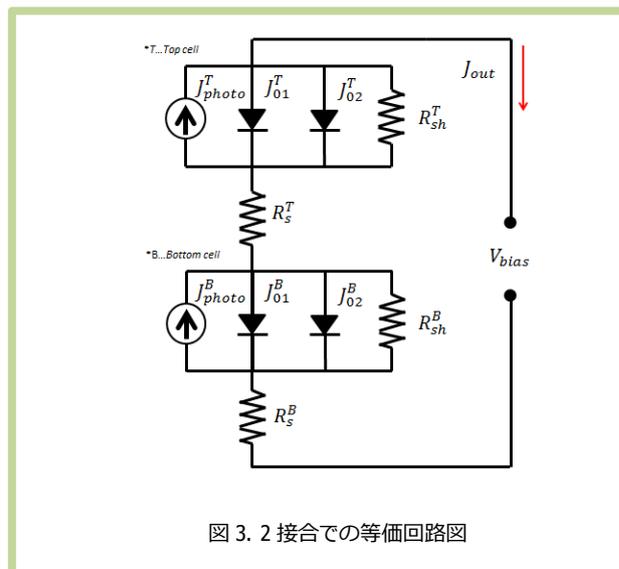
EQE 測定では、外部バイアスを一定に保ちながら波長を変化させ、各波長ごとの電流を測定している。しかし今回提案する手法では、測定したいサブセルに対して照射する波長は変化させず、外部バイアスを変化させながら電流を測定する。こうすることにより、

各サブセルの I-V カーブを測定することが出来る(図 1). この測定方法を今後, 「SR-V 法」と呼ぶ^[3]. 図 2 に 3 接合でボトムセルの SR-V を測定する場合の概略図を示す.

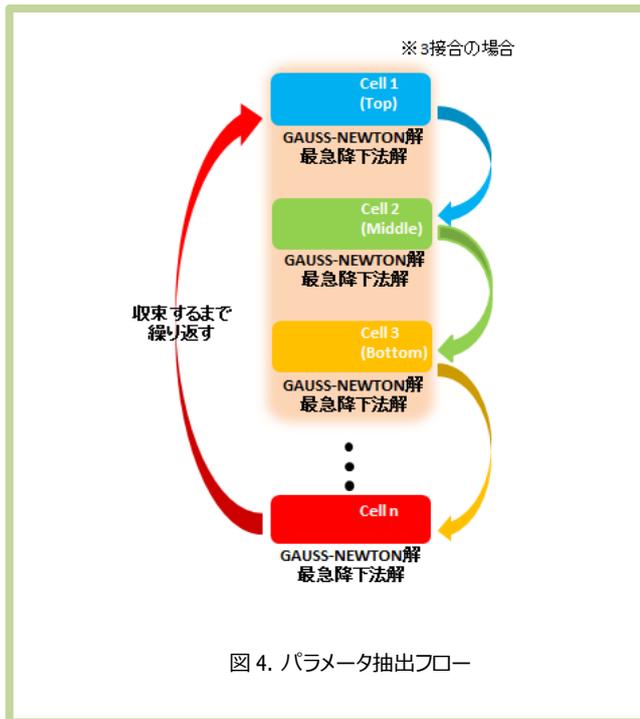


この測定によって得られた各サブセルの I-V カーブを用いて電気特性を抽出する. 実際に抽出するパラメータは, 太陽電池を等価回路で表したダイオードパラメータになる(図 3). ここでは 2 接合を想定しているため, 等価回路も二層になっている. また本来はサブセル間にトンネルダイオードが存在するが, この等価回路モデルでは省略している. ダイオードパラメータは, $J_{01}[A/cm^2]$: 逆方向飽和電流係数(拡散電流成分), $J_{02}[A/cm^2]$: 逆方向飽和電流係数(非発光再結合電流成分), $R_s[\Omega cm^2]$: 直列抵抗, $R_{sh}[\Omega cm^2]$: 並

列抵抗, $J_{photo}[A/cm^2]$: 生成電流成分, が各サブセルに存在する. これらパラメータを全て抽出する. 抽出するための方法として, 非線形最小二乗法の一つである, 「Powell の Hybrid 法」を用いる. Hybrid 法は, 非線形性の強い場合は最急降下法解, 線形性が強い場合は Gauss-Newton 解, というようにカーブフィッティングをするデータのばらつきに応じて最適解を算出していくため, 非線形性の強いデータに対しても非常に有用で, 安定して収束する.

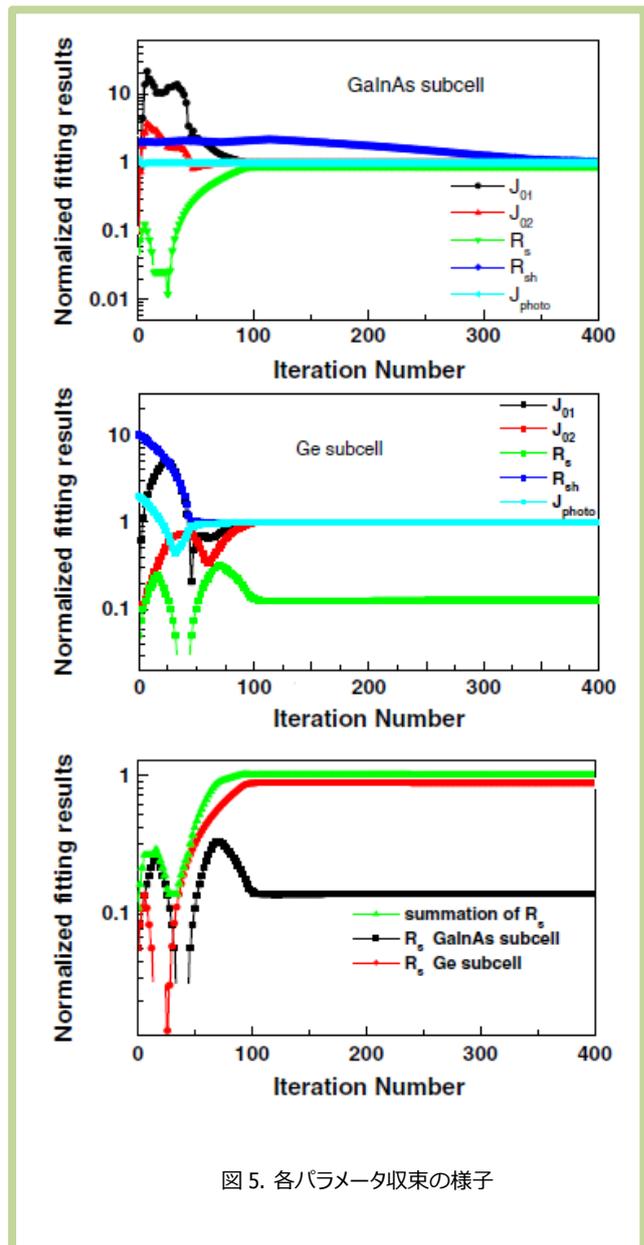


パラメータ抽出をするフローを図 4 に示す. 先ず, サブセル 1 のデータに Hybrid 法を用いて一度だけフィッティングを行う. その後, サブセル 2 のデータに対しても同様に一度だけフィッティングを行う. 3 接合であればサブセル 3 に対しても行う. 全てのサブセルに対して一度だけフィッティングを行った後, もう一度最初にフィッティングを行ったサブセル 1 に戻り, 同様の作業を行う. このループを何度も繰り返し実行し, 全てのパラメータが殆ど変化することがない状態になった時, 収束したと判断し, そこでループを終了させる. その終了したときのパラメータを各サブセルの電気特性とする. この計算で優れている点は, 各サブセルの I-V カーブに対して自己無撞着にフィッティングを行っているため, サブセル間での相互作用を無視することなくパラメータを抽出でき, 非常に精度が良いということである.



実際に測定したデータへフィッティングをする前に、ここまで述べてきた電気特性の抽出が想定通りに行われるかを証明するために、抽出するパラメータの値が最初から分かっているデータに対して、どのように

収束し、どの程度の収束性を持つかを調べる。その収束性を示したものが図 5 である。図 5 は 2 接合太陽電池を模擬しており、通常格子整合のとれた 3 接合で使用されるミドルセル (GaInAs) とボトムセル (Ge) の二つを組み合わせたものである。また最初から分かっているパラメータとしては、実際に作製された太陽電池でおおよそ得られる値をそれぞれ用いている(表 1)。これら各種パラメータは、繰り返し回数が 400 回を超えた時点で全てほぼ真値となっており、正しく抽出されていることが分かる(ただし、直列抵抗は二つの合計値として正しく得られる)。真値との誤差は、全てのパラメータで 1% 以下まで抑えられている。



以上の結果により、SR-V法で得られた実験結果と提案したアルゴリズムによって正しくパラメータ抽出をすることが可能であるということを示せたので、この手法を我々が実際に作製した 2 接合タンデム太陽電池 GaInAs/Ge に適用し、パラメータ抽出を行う。

表 1. 各種パラメータの真値と初期値

		$J_{01}(\text{A}/\text{cm}^2)$	$J_{02}(\text{A}/\text{cm}^2)$	$R_s(\Omega\text{cm}^2)$	$R_{sh}(\Omega\text{cm}^2)$	$J_{photo}(\text{A}/\text{cm}^2)$
GaInAs subcell	True value	2.2E-18	1.0E-10	0.2	1.0E6	1.0E-4
	Initial value	2.2E-19	1.0E-11	0.02	2.0E6	1.1E-4
Ge subcell	True value	9.6E-6	7.9E-5	0.2	50	1.0E-4
	Initial value	9.6E-7	7.9E-6	0.02	500	2.0E-4

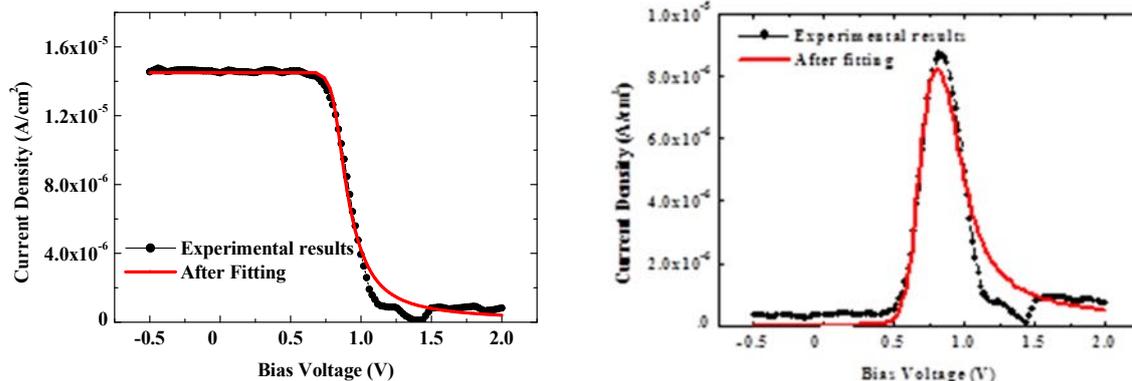


図 6. SR-V データのシミュレーション結果と実験結果

表 2. SR-V データへのフィッティングで得られた各種パラメータ

		$J_{01}(\text{A/cm}^2)$	$J_{02}(\text{A/cm}^2)$	$R_s(\Omega\text{cm}^2)$	$R_{sh}(\Omega\text{cm}^2)$	$J_{photo}(\text{A/cm}^2)$
Ga _{0.99} In _{0.01} As subcell	Initial value	1.6E-17	2.2E-14	0.2	1.0E5	1.5E-5
	Fitted value	2.9E-18	1.2E-11	0.15	1.2E6	1.4E-5
Ge subcell	Initial value	6.0E-6	8.0E-6	0.2	50	1.4E-5
	Fitted value	1.4E-5	1.4E-4	0.05	2.0E3	1.7E-5
Fitting accuracy	$Rss = \sum (J_{measure} - J_{fit})^2 \sim 1.0E-4$					

図6は、実験値とフィッティング後のSR-Vデータの比較を示している。実験値と比較しても、ほぼ誤差のない形でパラメータの抽出ができています。最終的に収束したパラメータと初期値を表2に示す。表2より、Geの並列抵抗・拡散電流成分に改善の余地があるなど、各サブセルに対しての有益な情報を得ることが出来る。更にこれらパラメータを用いることで、集光時にどのような特性を示すか、というシミュレーションも可能となる。

今回の報告では、2接合太陽電池の評価・解析のみとなったが、本報告で提案した手法は接合数に依存することなく適用できる。この手法により従来困難とされてきた多接合タンデム太陽電池の各サブセル

の電気特性を評価・解析することができ、今後更に注目されていく集光型太陽電池の変換効率向上に大きく貢献することが期待される。

参考文献

[1] Jenny Nelson, *THE PHYSICS OF SOLAR CELLS* (Imperial College Press)(2009)
 [2] R. R. King, D. Bhusari, A. Boca, D. Larrabee, X.-Q. Liu, W.hong, C.M. Fetzer, D. C. Law, and N. H. Karam, “Band gap-voltage offset and energy production in next-generation multijunction solar cells,” Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2011; **19**:797-812
 [3] T. Sogabe, A. Ogura, M. Ohba and Y. Okada, “Self-consistent electrical parameter extraction from bias dependent spectral response measurements of III-V multi-junction solar cells,” Prog. Photovolt: Res. Appl. (2013), DOI: 10.1002/pip.2