

「太陽エネルギー技術研究開発/
革新的太陽光発電技術研究開発
(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」
(中間評価) 分科会
資料 5

「太陽エネルギー技術研究開発/
革新的太陽光発電技術研究開発
(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」

事業原簿 **【公開】**

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	------------------------------------

－目次－

概 要	iii
プロジェクト用語集	vi
I. 事業の位置づけ・必要性について	
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDOが関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果	I-1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1
1.1 研究開発の目的	II-1
1.2 研究開発の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-1
2.1 研究開発の内容	II-1
2.2 研究開発の実施体制	II-46
2.3 研究開発の運営管理	II-56
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性	II-57
3. 情勢変化への対応	II-57
4. 中間評価結果への対応	II-59
5. 評価に関する事項	II-59
III. 研究開発成果について	
1. 分野別、課題に対する主要な成果	III-1
2. 個別テーマの成果概要	III-18
3. 成果発表の件数	III-98
IV. 実用化の見通しについて	
1. 実用化の見通し	IV-1
2. 波及効果	IV-11

(添付資料)

添付資料1：プロジェクト基本計画

添付資料2：事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

添付資料3：特許論文リスト

開発予算 (単位：億円)	会計・勘定		H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY	総額
	契約種類：委託	一般会計		0	0	0	0	0		
	特別会計(需給)		26.4	17.6	28.3	19.9	21.0			113.2
	総予算額		26.4	17.6	28.3	19.9	21.0			113.2
開発体制	経済産業省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課								
	プロジェクトリーダー	設置せず ただし、下記の各グループはグループリーダーとして NEDO が指名 東大 G：中野 義昭 教授 産総研 G：近藤 道雄 センター長 東工大 G：小長井 誠 教授 日 EU 共同開発：山口 真史 教授								
	委託先	『Ⅱ. 研究開発マネジメントについて』の図 1～8 (実施体制 1～8) 参照								
情勢変化への対応	<p>【平成 20 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> より強固な体制での研究開発実施の為、当初予定額 18.7 億円に対し、4.7 億円の予算増額を行った。 補正予算 5.0 億円で、後年度購入予定装置の一部を前倒し購入し、研究開発を加速した。 <p>【平成 21 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 革新的太陽電池のモジュール評価技術を確立する為に、追加公募を行った。 「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」を加速する為に、2.1 億円の予算増額を行った。 <p>【平成 22 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 集光型太陽電池のモジュール設計、評価技術を確立する為に、追加公募を行った。 『量子ドット』太陽電池等の開発を加速する為に、4.1 億円の予算増額を行った。 <p>【平成 23 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 中間評価の結果を踏まえ、サブテーマ数を 73 から 55 に絞り込んで本事業を継続した。 <p>【平成 24 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 『3 接合化合物』太陽電池の実用化を加速する為に、2.5 億円の予算増額を行った。 									
評価に関する事項	事前評価	平成 19 年度実施 (担当部：新エネルギー技術開発部)								
	中間評価	平成 22 年度実施、平成 24 年度実施予定								
	事後評価	平成 27 年度実施予定								
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>【平成 22 年度中間目標及び成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> Ⅲ-V 族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 33%と集光時の変換効率 42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を 10%高めることに資する。→非集光時変換効率 35.8%、集光時変換効率 42.1%を達成。量子ドットを利用した 2 段階の光学遷移を実証。GaAs セルで 10%程度の光吸収効率向上を達成。 シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率 20%に資する。→新概念太陽電池の動作原理を実証。その他は未達。 バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネージメント・TCO 等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積：1cm²) を達成する。→20.3%達成。 集光型太陽電池の屋内における高精度評価技術の開発を完了すると共に、日本と米国内での屋内外性能測定との比較検証を行う。従来開発した単接合および従来型 2 接合太陽電池の評価技術をベースに、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の開発を完了する。→目標達成。 <p>【平成 24 年度中間目標及び成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> Ⅲ-V 族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 36%と集光時の変換効率 45%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証し、窒化物セルにおいて非集光時変換効率 10% (単接合) および 20% (多接合)、量子ドットマルチバンドセルにおいて集光時変換効率 25%を達成する。光マネージメント技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を 3 倍に高め、上記目標の達成に資する。→非集光時変換効率 37.5%達成。量子ナノ構造層の光吸収 3 倍達成。その他は達成予定。 ボトムセルおよびトップセルの要素材料の開発並びにデバイス化を行う。また高度光利用技術、スマートスタック技術を開発し、多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。→達成予定。 薄膜フルスペクトル太陽電池の光吸収層、ならびに周辺技術等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 25% (有効受光面積：1cm²) を達成する。→達成予定。 セル変換効率 42%以上、モジュール変換効率 33%以上を達成し、集光型太陽電池の高精度測定の課題を明確にする。→セル変換効率 43.5%達成。その他は達成予定。 									
	投稿論文	「査読付き」461 件、「その他」53 件 (H24 年 6 月末現在)								

	特 許	「出願済」118(28)件、「登録」0(0)件（うち国際出願件）(H24年6月末現在)
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」2,211件、「新聞・雑誌等への掲載」134件、 「展示会への出展」37件 (H24年6月末現在)
IV. 実用化の見通しについて	<p>太陽光発電ロードマップ PV2030+によれば2050年には国内市場向けだけでも太陽光発電産業は約4兆円産業に成長すると推定される。</p> <p>本事業は超長期的な技術開発を進め、革新的な技術により太陽光発電の変換効率の向上及び発電コストの低減を目指すものであるが、それらの技術開発は、短期的にも現状の太陽電池の特性向上に役立つ技術への波及効果が期待でき、我が国の太陽光発電産業の国際競争力の維持向上が期待される。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成20年3月 策定
	変更履歴	<p>平成20年8月 内容の明確化の為、『拠点』を『中心研究機関』あるいは『グループ』に変更</p> <p>平成20年10月 達成目標について、委託先と協議の上、詳細な数値を決定し追記</p> <p>平成21年8月 「革新的太陽電池評価技術の研究開発」を追記</p> <p>平成22年3月 「新エネルギー技術研究開発」基本計画の研究開発項目⑦「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」及び新規研究開発項目「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」を統合し新たに「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画を制定し、同時に「日・EU エネルギー技術協力 太陽光分野」を追記</p> <p>平成23年3月 中間評価の結果を踏まえ、達成目標について、平成24年度中間目標の追記及び平成26年度最終目標の修正</p> <p>平成24年3月 「日・EU エネルギー技術協力 太陽光分野」を「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）」に変更し、同時に達成目標について、詳細な数値を追記</p>

プロジェクト用語集

用語（日本語）	用語（英語）	用語解説
圧電性（or圧電効果）	piezoelectricity	結晶に圧力が加わり格子が歪んだ際に分極が生じること。GaNの様にイオン結合性を有する結晶において、例えば[0001]軸方向にGaとNの格子位置がずれると、分極が生じる。
アライメント	alignment	集光型太陽光発電システムの各構成部材において、各受光面に対する各入射光線がどのような角度関係にあるかを表すもの。
アレイ状メサ	arrayed mesa	規則正しく配置されたメサ（段差）。
イオン液体	ionic liquid	有機分子のイオン対からなる液体で、真空中、室温以上でも蒸発しない。本事業では、これを有機溶媒として、有機単結晶薄膜を真空蒸着するのに用いる。
色収差	chromatic aberration	レンズで太陽光を集光する場合、各波長によってその焦点距離が異なる現象。
ウェット処理	wet treatment	主に化学薬品等の液体に浸漬させる、基板や半導体材料の表面処理技術。一般的な洗浄処理も含まれる。
ウェハ曲率モニタリング	monitoring of wafer curvature	ウェハの曲率（反り具合）の測定。
ウェハボンディング	wafer bonding	ウェハ接合ともいう。表面をクリーニングしたウェハ同士を向き合わせ、圧力をかけて化学的に原子レベルで結合させる技術。
エアロゾル	aerosol	気体中に浮遊する微小液体または固体の粒子。
エキシトン拡散長	exciton diffusion length	光生成した励起子が、再結合によって消滅する前に、材料を介して拡散することができる平均距離。
エッチピット密度（EPD）	etch pit density	結晶中の転位がある部分を選択的にエッチングする溶液を使って現れる凹み（ピット）の密度で、通常は転位密度に等しい。
エピタキシャル成長	epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
階段ポテンシャル量子井戸	step-potential quantum wells	量子構造において、バンド端にエネルギーが階段状になっている構造。組成を段階的に変化させて形成する。
化学パッシベーション	chemical passivation	半導体材料において表面欠陥等に起因する少数キャリアの表面再結合を抑制する目的でなされる表面終端化（安定化）技術の一つで、主に化学薬品への浸漬処理でなされる。一般的な酸化やプラズマ処理、その他薄膜材料形成（堆積）によるパッシベーションと対比される。
化学熱力学	thermochemistry	化学反応を熱力学的に解析する学問であり、電気化学反応における標準電極電位とpHは反応に関わる物質の化学ポテンシャルから求まる。
拡散長	diffusion length	励起子または光キャリアがその寿命の間に広がることのできる距離。
過剰キャリア寿命	excess carrier lifetime	平衡状態より過剰に存在するキャリアが減少していく割合（1/eになる時間）で、太陽電池の効率と相関がある。
カーボンナノチューブ	carbon nanotube (CNT)	カーボンナノチューブは、炭素原子が六員環に組んだ2次元ネットワーク状物質を筒状に丸めた物質である。一層の2次元ネットワーク状の丸め方に応じて単層カーボンナノチューブ半導体にも単層カーボンナノチューブ金属にもなる。
ガラス上ゲルマニウム薄膜基板	germanium-on-glass substrate (GeOG)	ガラス板上に水素イオン注入したゲルマニウムウェハを加熱接合し、注入部でゲルマニウムが剥離することを利用して、薄いゲルマニウム単結晶膜がガラスに接合した構造をもつようにした基板。
ガラス上シリコン薄膜基板	silicon-on-glass substrate (SiOG)	ガラス板上に水素イオン注入したシリコンウェハを陽極接合し、注入部でシリコンが剥離することを利用して、薄いシリコン単結晶膜がガラスに接合した構造をもつようにした基板。
ガルバノメータ	galvanometer	モーター回転軸に取り付けたミラーを高速・高精度に走査あるいは位置決めする光学スキャナ。
貫通転位	threading dislocation	エピタキシャル層において、螺旋転位、刃状転位、混合転位により、発生後成長層上部まで伝搬した転位。
逆オージェ過程	inverse auger process	バンドギャップの2倍以上のエネルギーを持つ光子を吸収して、複数のキャリアを生成する過程。
逆格子点の回折強度分布	distribution of diffraction intensity	結晶は3次元で周期性を持つため、それを反映したBraggピークも3次元で格子状に配列する。これを逆格子点と呼ぶ。理想的な結晶ではB

	y for reciprocal lattice point	raggピーク（逆格子点）でのみX線回折が発生する。結晶が不完全（結晶欠陥、不純物含有）な場合に、逆格子点近傍でも回折強度を有することにより生じる回折強度の分布のこと。これを解析する事により結晶内部の欠陥分布等の知見を得る事が出来る。
キャリア取り出しダイナミクス解析	analysis of carrier-extraction dynamics	量子井戸内部で光励起により形成されたキャリア（電子および正孔）が、ピコ秒からナノ秒の時間スケールにおいて井戸から脱出してp型n型領域に淘汰する過程の解析。
（非）急峻性	(non-) abruptness	結晶組成が原子レベルで急激に変化する（しない）こと。
許容角	acceptance angle	出力性能が90%に低下するような、受光面の法線に対する入射光角度。
金属誘起結晶化	metal induced crystallization	金属を触媒として結晶化温度より低い温度で結晶化すること。
傾斜組成層	graded-content layer	結晶の組成が連続的に変化する層。
傾斜組成バッファ層	graded buffer layer	ある混晶の組成を傾斜変化させた緩衝（バッファ）層の一種。基板とエピタキシャル膜に格子不整合（原子間隔のずれ）がある場合、欠陥の発生を抑制するため、両者の中間の組成の材料を基板からエピタキシャル膜に向けて格子定数が徐々に変化するよう調整した層。InGaAsの場合、InとGaの組成比を成長方向に対して傾斜変化させる。太陽電池中の転位密度を低減する役割がある。組成の傾斜方法としてステップ傾斜やリニア傾斜などがある。
コア/シェル構造	core/shell structure	2種類の化学種の一方が核（コア）を形成し、もう一方の化学種がその周囲を取り囲んだ（シェル）構造のこと。
高压ガスプレス	press by high-pressure gases	ソーラーセルの接合に高压ガスをもちいる事により均一に加圧して接合する方法。
格子不整合系	lattice mismatch	格子定数が基板結晶と成長層の間で整合しない材料系。太陽電池材料のバンドギャップエネルギーを自由に制御できるため、熱損失の少ない高効率の太陽電池構造を設計できる。一方、結晶には歪がかかるため、転位などの格子欠陥が発生する。対義語は格子整合系（lattice match）である。
固相成長	solid phase crystallization	固体のまま非結晶物質が結晶化すること。
コンビナトリアル法	combinatorial method	材料物性に影響する因子（組成、種々の作製条件）を系統的に変え、その影響を高速かつ定量的に評価する科学的手法。
サーファクタント原子	surfactant atoms	結晶表面層の改質を起こさせる表面原子のこと。
三段階法	three stage evaporation method	多元蒸着法の一つ。カルコゲナイド系薄膜形成で幅広く使われ、Cu(InGa)Se ₂ 太陽電池では20.3%の変換効率が達成されている。
自己形成ナノホール埋め込み層	embedded layer with self-formed nano holes	薄い層で埋め込まれた量子ドットの直上部のみにナノホールが自己形成（熱処理により自然に形成）された埋め込み層のこと。
視野角	view angle	被照射面から光源を臨んだ時の最大入射光角度。
シャドー	shadow	影になること。
集光型太陽光発電	concentrating photovoltaics (CPV)	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
集光型太陽電池ユニット	CPV unit	1対の集光型太陽電池セルと集光光学系から構成された、太陽光を受けて発電する単位。
集光倍率	concentrating ratio	集光型太陽電池の集光光学系に入射する光の照度と、集光された後に太陽電池に入射する照度との比率。
少数キャリア拡散長	minority carrier diffusion length	例えばn層ならば注入された過剰正孔、p層ならば注入された過剰電子の密度が1/eになるまでの距離。
シリコン-ゲルマ（シリコンゲルマニウム）	silicon-Germanium (SiGe)	シリコンとゲルマニウムの合金材料。組成を変えることでバンドギャップを0.7-1.1eVの範囲で変えることができ、多接合太陽電池のボトムセル用材料に適する。
ストリーク	streak	特定の条件下で、Braggピーク（逆格子点）近傍の回折強度が線状、縞状の分布となること。
成長ピット	growth pit	GaN系格子不整合ヘテロ接合や高濃度不純物ドーピング層成長時、或いは比較的低温で成長を行う場合、貫通転位や偏析等局所的に歪のあるところでは、主面以外の安定面が発生しやすい場合がある。例

		例えば主面が[0001]面の場合、{10-1-1}面や{11-2-2}で囲われたV字状の穴が生じることがある。この穴を成長ピットと呼ぶ。
接合抵抗率	connecting resistivity	ソーラーセルを直列接続した場合の接続領域に縦方向に電流が流れるときの抵抗率 (Ωcm^2)。
走査型静電容量顕微鏡	scanning capacitance microscopy (SCM)	走査顕微鏡 (SPM) の一種であり、容量 (C) を計測しキャリア濃度分布、p/n極性を観測することができる手法。
双晶	twins	同一の材料に2つ以上の単結晶のドメインが存在し、それぞれのドメインの結晶方位に、幾何学的な特定の規則性があるものを示す。それぞれのドメインの界面 (双晶面) は結晶欠陥となるため、太陽電池特性の低下につながる。
層状ポリシラン	layered polysilane	平面ポリシランが幾層も重なった構造を有するポリシラン。
素子分離用トレンチ	trench for device isolation	隣接する素子 (この場合はpn接合) を平面内で分離して絶縁するための溝 (トレンチ)。
多元蒸着法	multi-source evaporation method	真空チャンバー内で複数の原料を加熱して蒸発させ、基板に付着させて薄膜を作る技術。
多重キャリア生成	multiple carrier generation (MCG)	ひとつの光キャリアが電子間相互作用を介して玉突き現象的に多数のキャリアを生み出す現象。
多重励起子生成	multiple exciton generation (MEG)	ひとつの光キャリアから複数の励起子が生成する現象。励起子が解離することで複数のキャリアが生成する。
多接合太陽電池	multi-junction Solar Cells	複数の太陽電池 (ソーラーセル) の直列構造からなる素子。各セルで波長を分割して受光することにより、効率的に発電が可能となる。
多波長同時観測	simultaneous observation at multiple wavelengths	光スペクトルを分光して空間的に分散させたものを、複数の光センサで同時に計測することによって、異なる波長の情報を同時に観測すること。
単結晶ラミネート法	single crystal lamination	厚さがサブミクロンから数ミクロンの薄片単結晶を基板上に張り付けることで素子を作製する方法。
単一成分系有機半導体	single-component organic semiconductor	単一成分からなる有機半導体。
中間バンド	intermediate-band	量子ドットのミニバンドが、周りの半導体のバンドギャップの中間付近に形成された場合のこと。それらが形成する3つのバンドで太陽光を吸収するのが中間バンド太陽電池である。
超格子	superlattice	異なる半導体材料を交互に重ねてできる構造。(とくに障壁層の) 厚さが小さい (通常数ナノメートル) 井戸と障壁層が多数繰り返した多重量子井戸量子ドット超格子の場合、量子ドットが規則正しく並んだ構造のこと。
直接接着 (接合)	direct bonding	原子、分子間の結合力を利用した接合技術の総称。概略的には、ファンデルワールス力によるもの、あるいはプラズマ等により接合表面を活性化して原子レベルで結合する方法がある。
直達基準太陽光スペクトル	direct normal reference solar spectrum	放射照度および分光放射照度分布を規定した自然太陽光の直達日射成分のこと。
ツインレーザー型有機フラックス製膜装置	twin-IR laser deposition system for flux-growth of organic crystals and films	赤外レーザーをパルス状に照射して、固体有機材料やイオン液体を真空蒸着する装置。2つの赤外レーザーを用いて、複数の試料を同時蒸着することができる。
抵抗成分	resistance component	太陽電池内部の抵抗の成分。太陽電池内に大きな抵抗成分があると、ジュール熱が発生しエネルギーをロスする。高電流を扱う集光型太陽電池では、抵抗成分を小さくする必要がある。
転位	dislocations, defects	成長する薄膜と基板との格子定数が異なる場合、格子不整合により発生する結晶欠陥。太陽電池性能の劣化の原因となる。
転位挙動解析	analysis of dislocation behavior	転位は格子欠陥の一種で一次元的な線欠陥のこと。結晶のすべり変形によって生成される。キャリアの再結合中心として働くため、太陽電池特性の低下を引き起こす。転位挙動解析は結晶成長中に発生する転位の運動や転位同士の相互作用などを解析すること。

転位のすべり運動	dislocation glide	結晶のすべり変形の担い手。実際のすべり変形は転位がすべり面上をすべり運動することによって局所的に変形が進行する。転位のすべり運動は特定の結晶面上で特定の結晶方向に沿って起こる。
転位密度	dislocation density	結晶中の線状の結晶欠陥の面密度。
電界制御型太陽電池	electric field controlled solar cell	窒化物半導体薄膜の内部に形成される分極電場の向きを、素子構造によって制御した太陽電池。
電界走引	electric-field scanning	光信号の時間応答を調べるため光を光電変換によって電子に変換し、電子の進行方向に垂直に電界を走引することによって、時間軸を空間軸に変換すること。
電荷移動励起	charge-transfer excitation	ドナーからアクセプターへの電子移動に伴う光励起。
電荷整列絶縁体	charge-ordered insulator	固体中に大量に存在する電荷が、強いクーロン相互作用によってお互いに反発し合い、周期的な秩序を組んで局在化している絶縁体。
点欠陥	point defect	原子サイズの結晶の乱れ（欠陥）。結晶中で本来原子が存在すべき位置に原子が存在していない空格子点（原子空孔）や他の元素原子と置き換わる置換原子がある。また、原子が存在すべきでない位置に原子が入り込んだ格子間原子もその一つである。これら結晶格子の乱れはキャリア（電子）の散乱原因になり得る。
透明導電性接着剤	transparent conductive adhesive	太陽光波長範囲で透明かつ導電性を有する接着剤。
トップダウン型合成方法	top-down synthesis	必要な構造を有する化合物のみを取り出す合成方法。
ドーピング	dope	結晶の物性を変化させるために少量の不純物を母材結晶に添加すること。GaAsNにSi原子をドーピングするとGaAsNはn型半導体に変化する。
ドーム型ケーラー光学系	dome-shaped Köhler optics	ドーム状の形をした、平面と点を変換する光学系。光学顕微鏡での標本の照明や、プロジェクタなどの投影機、フォトリソグラフィなどの光源として利用される。
ドライ処理	dry treatment	主に反応性ガスやプラズマ処理などを用いる、化学薬品等の液体を用いない基板や半導体材料の表面処理技術。
トレインサブレーション法	train-sublimation method	有機材料の昇華性を利用した、有機半導体材料の昇華精製法。
トンネル接合抵抗	resistance of tunnel junction	トンネル接合（多接合セルにおいて隣接するpn接合間に形成されたオーム性の電気伝導特性を示す半導体のヘテロ接合）における電気伝導抵抗。
トンネルピーク電流	peak current through of tunnel junction	トンネル接合は限られた電流範囲においてのみオーム性の電気伝導特性を示し、その範囲を超えると負性抵抗など多接合の動作を阻害する伝導特性を生じる。「トンネルピーク電流」とはオーム性の電気伝導特性が得られる範囲の最大電流であり、より高い集光倍率まで多接合セルを動作させるためには大きなピークで電流が必要となる。
トンネル輸送	tunneling transport	量子力学におけるトンネリングの原理に基づいて、キャリアが量子井戸層の障壁を超えて移動すること。
ナノインプリント加工	nano-printing	ナノレベルの微小な凹凸のある「鋳型」（モールド）の型押しによりナノ構造を作る技術。特長としては、ナノからサブミクロンオーダーの3次元超微細形状が容易に形成できる、シンプルな加工プロセス（加熱&プレス）である、プロセスコストが低減でき量産化が容易であるなどが挙げられる。鋳型さえ作れば安価にパターン形成できる為、近年活発に研究されており、実用化をにらんだ鋳型および型押し装置の開発競争が繰り広げられている。次世代半導体製造プロセスの有望技術に留まらず、超高速光通信デバイスやバイオデバイス、次世代大容量ストレージデバイスといった、次世代の多種多様な電子デバイス応用を実現するキーテクノロジーとして期待されている。
ナノホール・スペーサー層	nanohole spacer layer	量子ドットを積層成長する際の量子ドット層間の薄いスペーサー層で多数のナノホールが形成されている層。
ナノ粒子	nanoparticle	物質をナノメートルのオーダー（1-100ナノメートル）の粒子にしたもの。比表面積が極めて大きいこと、量子サイズ効果によって特有の物性を示すことなど、一般的な大きさの固体の材料とは異なることから、様々な分野で利用が進められている。

バイアス印加	bias application	外から電圧を印加すること。
媒体接着 (接合)	adhesive bonding	接着剤、シート等を介して接合する技術の総称。太陽電池への応用としては、導電性および透明性を具備した接合特性を有する必要がある。
バッファ層	buffer layer	エピタキシャル成長において、成長する薄膜と基板の格子定数が異なる場合、薄膜に転位が伝播しないように薄膜と基板の間に挿入する緩衝層。
貼り合わせ	direct bonding	表面を活性化し、半導体同士を接合する技術。SiMOSトランジスタで開発された。低温度において多接合タンデム太陽電池が形成できる。
パルススパッタ法	pulsed sputtering deposition	パルス状に発生したプラズマを用いてスパッタリングを行う薄膜形成手法。安価でスループットが高いことや、低温結晶成長が可能といった利点を有する。
パルスレーザー堆積法	pulsed laser deposition (PLD)	固体ターゲットへのパルスレーザー照射による蒸発 (アブレーション) を利用した成膜法。多元系系の酸化膜合成に適した薄膜形成技術として注目されており、結晶性の高い薄膜を低温で容易に形成できるのが特長である。
半導体CNT	semiconducting carbon nanotube	CNTは、その構造によって金属または半導体の特性を有するが、化学的および電気的手法を用いて金属的なCNTを取り除いた、半導体的特性を有するCNT。
バンドオフセット	band offset	異種間半導体材料の接界面で形成されるポテンシャル障壁 (エネルギー差) の総称。伝導帯でのそれを ΔE_c 、価電子帯を ΔE_v と表記する。
反応性CVD	reactive chemical vapor deposition	低温で自然に反応するガス (シランやゲルマンとフッ素など) を用いて、所望の物質 (シリコンやゲルマニウムなど) の膜を堆積する方法。
光変調キャリア検出法	light-modulated carrier detection	光励起により生成したキャリアを電流として検出する方法。
光変調吸収分光	photoinduced absorption spectroscopy	光励起により生成した励起子やキャリアによる吸収スペクトルの変化を測定する方法。
歪緩和過程	strain relaxation mechanisms	歪緩和とは結晶格子に蓄積された歪が転位の発生により、解放 (緩和) されること。歪緩和には転位の運動や相互作用に応じて様々な過程が存在する。結晶成長中の歪緩和過程を理解することで、転位の運動や相互作用を制御でき、結果的に太陽電池材料の高品質化に繋がる可能性がある。
歪み補償	strain compensation	基板に対して格子定数大きい (圧縮歪みを受ける) 結晶層と格子定数小さい (伸長歪みを受ける) 結晶層とを交互に堆積し、相互に歪みのバランスをとることで、全体として堆積層にかかる歪みをゼロにする手法。歪みがかかる結晶層を多数堆積するために用いられる。
歪Ge	strained Ge	歪印加により、半導体のバンドギャップを制御する技術。Geに2軸性引っ張り歪を印加することで、直接遷移のバンドギャップが縮小し、吸収係数が増大、吸収層の薄膜化が可能となる。
表面パッシベーション	surface passivation	半導体素子の表面保護膜を作成する工程。
ファンデルワールス力	van der Waals force	電荷を持たない中性の原子、分子間ではたらく凝集力。この力を介して物体間の物理吸着が生じる。
プッシュコート法	push coating method	ポリジメチルシロキサン (PDMS) 版を用いて、溶液を押し込むことにより、高均質・高結晶性のポリマー型薄膜素子の形成を可能とする溶液プロセス技術。
物理気相成長法	physical vapor transport method	不活性ガスをフローさせながら有機材料を加熱することにより、単結晶を気相成長させる方法。
プラズマイオン照射法	plasma ion irradiation method	正イオンと負イオンおよび電子で構成されるプラズマ中に電極を挿入し、負または正の電位を印加することによって、エネルギーを制御して電極上にイオンや電子を衝突させる方法。
プラズマCVD	plasma CVD	プラズマを援用する化学気相成長法 (CVD) の一種。化学反応を活性化させるため、高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させ、薄膜等を堆積させる方法。
プラズモン	plasmon	電子が集団的に振動して擬似的な粒子として振る舞っている状態を指す。金属ナノ粒子ではプラズモンが表面に局在することになるの

		で、局在（表面）プラズモンとも呼ばれる。プラズモンと光の相互作用により強い光散乱が生じることが知られており、最近ではこれを太陽電池に応用する試みが行われている。
フラックス蒸着法	flux-mediated vacuum deposition	イオン液体を介した有機結晶・薄膜の作製方法で、イオン液体をフラックス（溶媒）として、予め結晶化させる有機原料を溶解したイオン液体溶液を冷却するのではなく、真空中でイオン液体中に連続的に有機原料を蒸着供給することで、過飽和状態とし、有機結晶・薄膜を析出させる方法。溶媒を冷却する必要がなく、結晶成長に有利な高温状態で、かつ過飽和度を蒸着速度で制御しやすい結晶成長方法。
フラックス法	flux method	フラックス法は、高温超伝導体のようなセラミックス、光学結晶を、原料を含む溶融塩から冷却して析出させる方法で、原理的には溶媒-冷却法と同じ方法。
ブロック共重合体	block copolymer	性質の異なる2種類以上のポリマーが共有結合で繋がり長い連鎖になったような分子構造の共重合体と呼ぶ。ブロック共重合体の特徴は、その各ポリマー鎖が独立して凝集し、微小な相分離構造を形成することにある。
分光エリプソメトリー	spectroscopic ellipsometry	直線偏光の光を試料に入射させ、試料から反射した光の偏光状態を調べ、膜の物性を記述するのに最適なモデルでフィッティングすることによって、薄膜の屈折率等の物性を測定する方法。
分子化合物半導体	molecular compound semiconductor	ドナーとアクセプター2種類の分子からなる有機材料。分子間電荷移動励起による吸収波長の長波長化により、低光子エネルギー領域での光電変換が期待できる。典型的な強相関電子系を与えることで知られ、これによる多重励起子生成効果も期待される。
分子線エピタキシャル成長 （分子線エピタキシー）	molecular beam epitaxy (MBE)	超高真空中で、複数の金属蒸発源から分子線を発生させ、加熱して清浄化された結晶基板上にそれぞれの材料のもつ付着係数の違いを利用して化学量論的組成比を保ち、半導体結晶を成長させる方法。
分子線エピタキシー装置	molecular beam epitaxy system	分子線エピタキシー法を用いた結晶成長装置。超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、これを加熱することで各元素を気化させる。気化した原子や分子の平均自由行程は数メートル以上と大きいいためビーム状で基板表面に供給される。使用する原料の状態が固体ソース、ガスソースMBE等に分類される。
平面ポリシラン	polysilane	IV族元素であるケイ素により骨格構造が形成されている平面高分子の総称。
ヘテロ接合	hetero junction	異種材料の接合。例えば、単結晶膜とアモルファス（非晶質）膜との接合。
偏光フーリエ変換赤外分光法	polarized Fourier transform infrared spectroscopy	結晶試料へ偏光赤外線照射し、吸収強度を測定する方法。欠陥の局在振動モードによる赤外吸収強度の偏光方向依存性により、欠陥を構成する原子の結合の向きが分かる。
捕獲断面積	capture cross section	結晶中に存在する捕獲中心、再結合中心といった欠陥における、キャリアの捕獲のしやすさを表す物理量。捕獲断面積が大きい捕獲中心や再結合中心はキャリアを容易に捕獲できるため、キャリア寿命に大きく影響を及ぼす。GaAsN中にはE1と呼ばれる大きな捕獲断面積を有した再結合中心が存在し、キャリア寿命の低下を引き起こす。
ポリフルオレンポリマー	polyfluorene	π 共役系高分子発光材料であるフルオレン系ポリマー（PFO）のこと。
ホール濃度	hole concentration	p型半導体中の正孔（ホール）濃度。
マルチホロー放電	multi-hollow discharge	小さなホローを多数設けた電極を使用した放電。放電をホロー中でのみ発生させる点、ホロー中のガス流を精密にコントロールできる点が特徴。
ミスフィット転位	misfit dislocation	格子不整合系ヘテロ接合に於いて、エピタキシャル成長層膜厚が臨界値を超えると、界面で転位を発生して格子緩和する。その際の転位のこと。
ミニバンド	mini-band	量子ドット超格子のドット間隔が数ナノメートル程度になると、ドット中電子の波動関数が重なりを生じ、電子が取り得るエネルギーが幅を持つようになる。それにより形成される新しいエネルギーバンドのこと。
無輻射遷移	nonradiative recombination	生成されたキャリアは再結合によって消滅する。再結合には、光を放つタイプと熱を放つタイプの2種類があり、熱を放って再結合する

		ものを無輻射遷移という。
メカニカルスタック	mechanical stack	一般的には、半導体素子等を機械的接合を介して直列に積層する技術のこと。太陽電池への応用としては、複数セルを直列接続し、多接合太陽電池構造を形成する技術として期待されている。
メサ (表面)	mesa	段差。
モット絶縁体	mott insulator	電子間の強いクーロン反発力のために絶縁体となった物質。遷移金属酸化物によくみられる。
有機強相関材料	organic strongly correlated system	電子間に強い相関をもち、これにより種々の電子相転移を示す有機材料のこと。
有機電荷移動錯体	organic charge-transfer complexes	電子供与性のドナー分子と電子受容性のアクセプター分子間で電荷移動が起こり、錯体を形成する有機結晶化合物のこと。そのいくつかは、有機超伝導体で知られる。
陽極接合	anodic bonding	シリコンとガラスを張り合わせる接合方法の一つ。シリコンウェハとガラスを張り合わせ、400-500°C程度に加熱しながら数100V~1kV程度の電圧を印加するとガラス中のイオンが移動し、強固な接合が形成される。
溶媒-冷却・蒸発法	solvent cooling or vaporization method	溶媒に結晶化させる原料を予め溶解した溶液を、温度を冷却、あるいは溶媒を蒸発させることで、過飽和状態とし、結晶を析出させる方法。
ラダーポリシラン	ladder polysilane	梯子が縦につながった構造を有するポリシラン。
リフトオフセル	lift-off cell	III-V族基板上に太陽電池を成膜した後、太陽電池のみを引き剥がすことで、高価な基板を再利用して低コスト化できると共に、セルの裏面で反射した光が厚い基板によって吸収されることによるロスの低減が可能な太陽電池。
量子ドット	quantum dot	主に半導体において、大きさ数~20ナノメートル程度の粒状の構造を作り、周りをバンドギャップの大きな半導体で覆うと、電子はその領域に閉じこめられ状態密度が離散化する。3次元全ての方向から電子を閉じ込めたものを量子ドットと称する。
励起光強度依存性	dipenendence on excitation light intensity	試料に光 (励起光) を照射し、生成されたキャリアの再結合による発光特性を調べるもので、その励起光強度を変化させたときの発光特性の変化を調べる方法のこと。
ロッキングカーブ	rocking curve	回折条件の変化に対する強度分布のことであり、結晶配向性に関する情報を与える。
ワイドギャップ半導体	wide-gap semiconductors	ワイドギャップ半導体は、SiやGaAsなどと比較して光吸収端が短波長領域に位置し、可視光領域での透過率が比較的高い半導体である。青色LEDなどで広く用いられているGaN材料は、ワイドギャップ半導体の一つである。本事業では、酸化チタンや酸化亜鉛などの紫外光領域に吸収端を有する金属酸化物を中心に検討を行っている。
a面GaN	a-plane GaN	ミラー指数では、GaNの(11-20)面のこと。GaとNが同じ密度で存在し、m面(10-10)面と共に無極性面と呼ばれる。a面で格子不整合ヘテロ接合を形成すると、例えば面内で格子が歪んでも、ヘテロ接合面に垂直な方向に自発分極や圧電分極を生じない。
Ag(InGa)Se ₂	Ag(InGa)Se ₂	Ag(銅)、In(インジウム)、Ga(ガリウム)、Se(セレン)の4元の元素から構成される化合物半導体、Cu(InGa)Se ₂ よりワイドバンドギャップの材料系。
a-IGZO	a-IGZO	アモルファスIn-Ga-Zn-Oの略称。
ALD装置	ALD (atomic layer deposition) apparatus	原料の吸着と酸化 (還元) を1原子層ずつ繰り返すことで極めて均一性および段差被覆性が高い膜を形成する製膜装置。
BIPV	BIPV	Built-In PV (建材一体型太陽電池モジュール) のこと。
Braggピーク	Bragg peak	結晶にX線を照射した際、結晶中の原子の規則的な配列により、特定の方向に強い回折ピークが現れる。このピークのこと。
CBE法	CBE (chemical beam epitaxy) method	化学線エピタキシー法。ガスソースMBEとも呼ばれる。成長室内が高真空であるため、ガス原料はビームを形成し、基板表面で分解される。
CIGSSe	CIGSSe	半導体Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CNT	Carbon nanotube	→カーボンナノチューブ。
Cu(InGa)Se ₂	Cu(InGa)Se ₂	Cu(銅)、In(インジウム)、Ga(ガリウム)、Se(セレン)の4元の元素から構成される化合物半導体。光吸収係数が大きく薄膜太陽電池材料

		として有望である。
DLTS法	DLTS (deep level transient spectroscopy) method	過渡容量分光法。半導体における深い準位（捕獲中心や再結合中心）を測定する方法。電気容量の過渡応答を利用して、トラップのエネルギー、密度、捕獲断面積を推測することができる。
Eg	Eg	バンドギャップエネルギー、禁制帯幅。
FDTD数値計算	FDTD (finite-difference time-domain method) numerical calculation	電磁界を支配するマクスウェル方程式を、時間に対して差分して数値的に解く方法。
FF	FF (fill factor)	太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなるとFFが減少する。
Fission過程	Fission process	有機分子性結晶などにおいて、シングレット状態の励起子が二つのトリプレット励起子に分裂する過程。トリプレット励起子のエネルギーがシングレット励起子の半分以下の時に起こりうる。
H掃き出しプロセス	Sweep-out process of H	結晶成長過程において、不純物H（水素）が結晶中に取り込まれず、表面側に掃き出されるプロセス。結晶成長時にHが常に表面側に掃き出されることによって残留不純物濃度が下がり、キャリア（電子）の散乱が抑制される。
In表面偏析	surface segregation of indium	MOVPEによる結晶成長中に、In組成が成長表面において他よりも大きくなる現象。
IPCE	incident photon-to-current conversion efficiency	外部量子効率。そのスペクトルは分光感度スペクトルに相当する。
ITO	indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。
MBE法	MBE (molecular beam epitaxy) method	分子線エピタキシー法。超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、これらを加熱することで各元素を気化させる。気化した原子や分子の平均自由行程は数メートル以上と大きいためビーム状で基板表面に供給される。使用する原料の状態で固体ソース、ガスソースMBE等に分類される。
MOCVD法	MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) method	有機金属化学気相成長法。有機金属化合物を原料とし、加熱した基板結晶表面に供給することで結晶成長させる。大面積にわたる均一な結晶成長が可能で大量生産向きである。
PLD	pulsed laser deposition	パルスレーザー堆積法。
r面サファイア	r-plane sapphire	ミラー指数では、サファイアの(10-12)面のこと。その上にa面のAlNやGaNが成長する。
RTA処理	RTA (rapid thermal annealing) treatment	急速に温度を上げ、短時間保ったのちに、急速に温度を低下させる処理。
SIMS	secondary-ion mass spectrometry	2次イオン質量分析法。
TEM	transmission electron microscope	透過電子顕微鏡。薄膜状の試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線を結合レンズ系で拡大する電子顕微鏡。薄膜試料内部の結晶構造、組成、電子状態などの情報が得られる。
X線光電子分光	X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)	被測定試料にX線を照射し、励起された電子のエネルギーを観測する方法。
2次イオン質量分析法	secondary ion mass spectrometry (SIMS)	被測定試料にイオンビームを照射し、衝突によって生じる2次イオンを質量分析する方法。
2層ARコート処理	bi-layer anti-reflection coating	2層の誘電膜を組み合わせ形成された表面反射率を低減させるための構造を形成すること。
3次元逆格子図測定	3 dimensional reciprocal space mapping	結晶欠陥等の3次元的な分布を測定する方法。一般のX線回折法では結晶の周期性および欠陥等によるその乱れをBraggピーク（逆格子点）近傍の1次元あるいは2次元に投影した結果しか得られないが、本方法では3次元的な分布を得ることが可能となる。

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。その中で 2007 年の「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説」において、2050 年までに温室効果ガスの排出量を半減する『Cool Earth 50』が発表された。太陽光発電はこの提案に貢献し、持続可能な社会の構築に資する技術の一つとして期待されている。大規模な普及を実現し、期待に応えるためには、太陽光発電の性能の飛躍的な向上が必要である。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。しかしながら、求める性能レベルにまで飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にはない革新的な技術の開発が必要不可欠である。

また、我が国の太陽光発電技術は世界のトップ水準にあるが、海外を見渡すと、近年、米国の Solar America Initiative (SAI：ソーラー・アメリカ計画) や欧州の Strategic Research Agenda (SRA：戦略的研究計画) など太陽電池に関する技術開発計画が策定され、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発が取り上げられており、既にいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。

革新的な太陽電池の開発にあたっては、多岐に亘る可能性の確認と選択を進めることが重要であり、それぞれの技術分野の専門家との協力により知見を積み上げていく必要がある。

このような観点から、温室効果ガスの半減に寄与する技術を確立し、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持するためには、我が国においても革新的な超高効率太陽電池の開発を実施する研究グループを形成し、その中心的研究機関を核として、優れた海外の研究者と協力を行いながら積極的かつ継続的な研究開発を推進する必要がある。

新コンセプトの太陽電池等、既存技術の延長にない技術革新を目指した長期視野での研究開発を実施する本事業は、上記ロードマップに従った長期にわたり軸のぶれない取り組みの一環であり、事業リスクが高く、実施期間も長期にわたることから、企業などが自主的に実施することは困難であり、NEDO 事業として行うことの意義は大きく、必要とされている。

1.2 実施の効果

地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。これにより、住宅や商業施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大することが可能となる。

また、2050 年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持し、産業競争力強化につながる。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

太陽光発電は、総合科学技術会議の「第 3 期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）において戦略重点科学技術に、また平成 19 年 4 月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2007）」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置づけられている。更に、平成 19 年 3 月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。

また、新・国家エネルギー戦略（平成 18 年 5 月公表）において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。本事業は太陽光発電システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。

本事業は、新コンセプトの太陽電池等、既存技術の延長にない技術革新を目指した長期視野での研究開発を実施することで、太陽光発電の経済性、性能、機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図

るものであり、太陽光発電の制約のない普及拡大を促進するために必要不可欠である。本事業で研究開発を行う低価格・高性能の太陽電池開発、抜本的改革技術の探索は、NEDO が平成 21 年 6 月に「2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) 」を改訂した「太陽光発電ロードマップ (PV2030+) 」においても中心的な研究開発課題として位置づけられている。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発の目的

革新的太陽光発電技術研究開発（以下、本事業）は、地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持し、産業競争力強化に資することを目的とする。

1.2 研究開発の目標

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7円/kWh未満）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本事業は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

個別研究開発テーマの最終目標及び中間目標は、テーマごとに取り組む技術の現在の成熟度と、2050年に到達すべき技術レベルから、平成26年度末時点で達成すべき技術レベルを判断し、詳細目標を設定した。（詳細目標は、「2.1.4 研究開発計画」を参照）

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 研究開発技術分野

本事業では、太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して「変換効率40%」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7円/kWh未満）」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。

本事業では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組むこととする。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流（研究員の派遣や受入れ等）を実施し、研究開発を促進させる。

本事業では以下の技術分野を対象とした。

- ・多接合型太陽電池
- ・量子ナノ構造太陽電池
- ・光マネジメント構造（波長変換・波長分割構造等）
- ・その他新規概念太陽電池（熱光起電力技術：TPV、プラズモン太陽電池等）

上記目標を達成するため、下記研究開発テーマについて研究開発を実施した。

- ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
- ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
- ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
- ④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）
- ⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）

2.1.2 研究開発項目の推移

平成20年度には、公募から選定された上記①～③の3件の研究開発を開始した。

平成21年度には、公募から選定された上記④の1件の研究開発を開始した。

平成23年度には、公募から選定された上記⑤の1件の研究開発を開始した。

【平成20～22年度】

研究開発テーマ毎の平成20年度から平成22年度までの開発スケジュールを表1に示す。なお、平成23年度以降のスケジュールについては、第1回中間評価の結果を踏まえ決定する。

表 1. 研究開発の全体スケジュール（平成 20～22 年度）

No	研究開発項目	H20	H21	H22
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発				
①-1集光型多接合太陽電池				
1	4接合太陽電池の研究開発	←	→	→
2	多接合太陽電池集光動作解析	←	→	→
3	広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の開発	←	→	→
4	エピタキシャル成長技術開発（逆エピ、格子整合型4接合）	←	→	→
①-2高効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発				
5	MOVPEナノ構造形成技術	←	→	→
6	高倍集光セル微細加工技術	←	→	→
7	次世代プロセス技術開発（InGaN多接合セル）	←	→	→
8	水素MBE法（GaInNAs:Sb/量子ナノ構造）	←	→	→
9	MOVPE法（GaInNAs/量子井戸構造）	←	→	→
10	エピタキシャル成長技術開発（量子構造挿入型、格子整合型4接合）	←	→	→
11	高倍集光セルの開発	←	→	→
①-3量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池				
12	量子ドット超格子型	←	→	→
13	量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）	←	→	→
14	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	←	→	→
15	光マネジメント（金属ナノ粒子）	←	→	→
①-4ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池				
16	界面電荷移動遷移型セル	←	→	→
17	新概念素子用ハイブリッド光電素材	←	→	→
18	多結晶化合物多接合太陽電池	←	→	→
19	ETA構造による新概念素子	←	→	→
20	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	←	→	→
21	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	←	→	→
22	ナローバンドギャップ太陽電池	←	→	→
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発				
②-1シリコン系3接合太陽電池の開発				
1	高配向性平面ポリシラン材料の開発	←	→	→
2	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	←	→	→
3	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	←	→	→
4	シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発	←	→	→
5	ガラス基板上的シリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術	←	→	→
6	ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開発	←	→	→
7	フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発	←	→	→
8	擬単結晶固相成長技術の開発	←	→	→
9	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	←	→	→
②-2化合物系4接合薄膜太陽電池の開発				
10	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	←	→	→
11	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	←	→	→
12	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	←	→	→
13	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	←	→	→
14	酸化物ワイドギャップ材料の開発A	←	→	→
15	酸化物ワイドギャップ材料の開発B	←	→	→
16	化合物系タンデムセルの開発	←	→	→
②-3新概念新材料の検討				
17	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討A	←	→	→
18	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討B	←	→	→

19	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討C	←		→
20	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討D	←		→
21	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討A	←		→
22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討B	←		→
23	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討A	←		→
24	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討B	←		→
25	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	←		→
②-4高度光利用技術の開発				
26	メカニカルスタック技術の開発A	←		→
27	メカニカルスタック技術の開発B	←		→
28	高度光閉じ込め技術の開発A	←		→
29	高度光閉じ込め技術の開発B	←		→
30	高性能透明導電膜の開発	←		→
31	高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発	←		→
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発				
③-1バンドエンジニアリング				
1	ナノドット禁制帯幅制御	←		→
2	マルチエキシトン	←		→
3	ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術	←		→
4	Geの遷移型制御	←		→
5	薄膜新素材	←		→
6	ワイド/ナローギャップ材料設計	←		→
③-2薄膜フルスペクトル太陽電池				
7	シリコン系薄膜集光型セル	←		→
8	広バンドギャップシリコン系薄膜	←		→
9	サブセル界面接合技術	←		→
10	カルコパイライト系集光型セル	←		→
11	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	←		→
12	構造設計とカルコパイライト系トップセル	←		→
13	光学設計技術	←		→
14	集光型CdTe薄膜	←		→
③-3光のマネジメント・TCO				
15	表面プラズモン	←		→
16	p型透明導電膜	←		→
17	フルスペクトルTCO	←		→
18	グラフェン透明導電膜	←		→
④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）				
1	集光型多接合太陽電池評価技術		←	→
2	薄膜多接合太陽電池評価技術		←	→

【平成 23～24 年度】

研究開発テーマ毎の平成 23 年度から平成 24 年度までの開発スケジュールを表 2 に示す。なお、平成 25 年度以降のスケジュールについては、第 2 回中間評価の結果を踏まえ決定する。

表 2. 研究開発の全体スケジュール（平成 23～24 年度）

No	研究開発項目	H23	H24
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発			
①-1集光型多接合太陽電池			
1	多接合太陽電池の評価解析	←→	←→
2	多接合太陽電池集光動作解析	←→	←→
3	多接合セル開発（格子不整合系）	←→	←→
①-2多接合用新材料開発			
4	多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）	←→	←→
5	量子井戸ミドルセル	←→	←→
6	GaInNAsミドルセル（CBE）	←→	←→
7	窒素系結晶成長の理論解析	←→	←→
8	GaInNAsミドルセル（水素MBE、MOVPE、量子ドット添加）	←→	←→
9	広帯域AlInGaN結晶を用いた多接合太陽電池	←→	←→
10	InGaN多接合セル新プロセス	←→	←→
11	ナローギャップボトムセル（CuTe）	←→	←→
12	近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた3接合用ボトムセル構築	←→	←→
①-3量子ドットマルチバンドセル			
13	量子ドット超格子セル	←→	←→
14	超高密度量子ドットセル	←→	←→
①-4光マネジメントに資する微細加工技術開発			
15	マイクロ集積集光セル開発	←→	←→
16	光閉じ込め微細構造の開発	←→	←→
17	表面修飾技術開発（ナノ構造修飾）	←→	←→
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発			
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発			
1	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	←→	←→
2	メカニカルスタック技術の開発	←→	←→
3	ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	←→	←→
4	ヘテロ接合デバイス化技術の開発B	←→	←→
5	高度光利用技術の開発A	←→	←→
6	高度光利用技術の開発B	←→	←→
②-2ボトムセルの開発			
7	SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	←→	←→
8	SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	←→	←→
9	SiGe系薄膜ボトムセルの開発C	←→	←→
10	SiGe系薄膜ボトムセルの開発D	←→	←→
11	有機単結晶材料ボトムセルの開発A	←→	←→
12	有機単結晶材料ボトムセルの開発B	←→	←→
13	ナノ材料系ボトムセルの開発A	←→	←→
14	ナノ材料系ボトムセルの開発B	←→	←→
15	強相関材料ボトムセルの開発A	←→	←→
16	強相関材料ボトムセルの開発B	←→	←→
②-3トップセルの開発			
17	ナノ材料系トップセルの開発A	←→	←→
18	ナノ材料系トップセルの開発B	←→	←→
19	ナノ材料系トップセルの開発C	←→	←→
20	化合物系トップセルの開発A	←→	←→
21	化合物系トップセルの開発B	←→	←→
22	化合物系トップセルの開発C	←→	←→
23	化合物系トップセルの開発D	←→	←→

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発		
③-1トップセル		
1	シリコン系薄膜集光型セル	←→
2	広バンドギャップシリコン系薄膜	←→
3	カルコパイライト系トップセル	←→
4	InGaN薄膜	←→
③-2ミドルセル		
5	Si量子ドット禁制帯幅制御	←→
6	ナノドット量子効果	←→
7	カルコパイライト系集光型セル	←→
③-3ボトムセル		
8	歪Ge	←→
9	非真空CuIn(Se, Te) ₂	←→
10	蒸着CuInTe ₂ 系セル	←→
③-4透明導電膜		
11	p型透明導電膜	←→
12	フルスペクトルTCO	←→
13	グラフェン透明導電膜	←→
③-5界面接合		
14	サブセル界面接合技術	←→
③-6光学設計技術		
15	光学設計技術	←→
③-7裏面反射		
16	表面プラズモン	←→
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）		
1	新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	←→
2	集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	←→
3	先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	←→
4	集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	←→
5	高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	←→

2.1.3 研究開発予算の推移

各年度毎の研究開発予算（実績）の推移を表3に示す。

表3. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

研究開発テーマ名	H20	H21	H22	H23	H24	総額
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	14.0	6.6	7.7	6.2	8.1	42.6
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	6.0	5.4	6.3	6.0	5.5	29.2
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	6.4	5.5	5.4	6.2	5.3	28.8
④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）	—	0.1	8.9	—	—	9.0
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）	—	—	—	1.5	2.1	3.6
合計 特別会計（需給勘定）	26.4	17.6	28.3	19.9	21.0	113.2

※平成24年6月30日現在

2.1.4 研究開発内容

研究開発項目別の開発内容、目標は以下の通りとした。

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

本テーマでは、東京大学を中心として、Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池の逆エピ格子不整合系・量子構造挿入型・InGaAsN(格子整合)挿入型のいずれかタイプにおいて、3ないし4接合を実現して、集光時のセル変換効率48%を実現し(平成26年度)、高集光セルで問題となる電流抵抗ロスの低減についても取り組む。また、これに加えて東京大学を中心として、新概念、新技術の太陽電池の創出を目指した研究開発を実施する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

平成22年度中間目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率33%と集光時の変換効率42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を10%高めることに資する。

平成24年度中間目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率36%と集光時の変換効率45%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証し、窒化物セルにおいて非集光時変換効率10%(単接合)および20%(多接合)、量子ドットマルチバンドセルにおいて集光時変換効率25%を達成する。光マネジメント技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を3倍に高め、上記目標の達成に資する。

平成26年度最終目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で変換効率45%以上(3接合・1,000倍集光時)、変換効率48%(4接合・1,000倍集光時)を達成する。また、新概念太陽電池については、窒化物セルにおいて非集光時変換効率20%(単接合)および30%(多接合)、量子ドットマルチバンドセルにおいて27%(非集光時)、40%(集光時)を達成する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を10倍に高め、上記目標の達成に資する。

表 4. 研究開発項目別開発内容、目標① (平成 20～22 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
①-1集光型多接合太陽電池						
1	20～22	4接合太陽電池の研究開発	豊田工業大学 (再委託：九州大学)	InGaAsN太陽電池の高効率化において、Nに起因した欠陥によるキャリア移動度、キャリア寿命の低下が最大の課題である。成膜時の表面反応過程の制御により欠陥密度低減が可能な、化学ビーム・エピタキシー (CBE) 法を用いて、高品質InGaAsN材料の開発を行う。InGaAsN材料の成膜過程、電子物性と欠陥物性を詳細に検討して、材料品質の向上をはかる。さらに、成膜過程の理解のため、III-V-N系半導体成長シミュレータの研究開発を、九州大学に再委託して行う。	<p>【22年度中間目標】 InGaAsN単接合太陽電池で非集光時変換効率15%を得る。</p> <p>【26年度最終目標】 シャープ(株)と相互に協力して、AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/(GeまたはInGaAs)4接合セルにおいて、非集光時変換効率35%、1,000倍集光時変換効率45%を達成する。</p>	
2	20～22	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学)	高効率化の観点からサブセル材料のバンドギャップの最適化をはかった格子不整合系3接合セルを対象に、高効率化に不可欠な転位挙動の解析と転位密度低減、ならびに集光動作による高効率化を研究する。格子不整合1.2eVのInGaAsのMBE法によるエピ成長および転位挙動の解析とそれに基づく転位密度低減を検討する。また、集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析を、宮崎大学に再委託して行う。	<p>【22年度中間目標】 シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率42%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 InGaAsN結晶成長技術およびシャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、集光時の変換効率45%を達成する。</p>	
3	20～22	広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の開発	名城大学	以下の要素技術を構築しながら研究を遂行する。 GaInN結晶成長技術の確立 低In組成 (20年度) 中In組成 (21年度) 高In組成 (22年度) p型GaInN導電性制御技術 低In組成 (20年度) 中In組成 (21年度) 高In組成 (22年度) GaInNおよびGaInNAs少数キャリア拡散長評価 少数キャリア寿命を各年度ごとに目標を定めて評価する。	<p>【22年度中間目標】 1.0eV帯または1.4eV帯の単接合セルにて、変換効率5%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池を検討し、単接合セルで変換効率10%以上を達成し、かつ、多接合セル製作の為の要素技術を確立する。</p>	
4	20～22	エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型4接合)	シャープ(株)	格子不整合系の逆積み3接合セルの成長条件の最適化を行う。23年以降は逆積み3接合セル技術を発展させて逆積み4接合セル検討を行い、併せて量子構造形成多接合セル、InGaAsN層導入多接合セル開発も行う。	<p>【22年度中間目標】 逆積み3接合セルで非集光時変換効率33%、集光時変換効率42%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 逆積み4接合構造、量子ドット挿入InGaAs(1eV)セル、もしくはInGaAsN(1eV)セルを形成したGe基板上4接合構造セルで</p>	

					非集光時変換効率35%、集光時変換効率45%を達成する。
①-2高効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発					
5	20 ～ 22	MOVPEナノ構造形成技術	東京大学	量子井戸を挿入してGeへの格子整合と長波長化を両立するミドルセルを、高スループットのMOVPEにより作製する。Pによる歪み補償を活用し、InGaAsあるいはInAsの積層量子構造を挿入した1.0 eV帯セルの成長技術を確立する。シャープ(株)と共同で格子整合系3接合あるいは4接合セルを作製し、1,000倍集光で効率45%を達成する。この目的のため、セル作製プロセスに移転可能な量子構造導入セルの成長技術を開発する。	<p>【22年度中間目標】 InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸を挿入したInGaAsミドルセルを作製し、1.2eV帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eVのトップセル下で16mA/cm²を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 量子井戸を挿入したInGaAsミドルセルを作製し、1.75eVのトップセル下でIsc=17mA/cm² (バンドギャップは1.2 eVに相当)、1.4eVのセル下でIsc=14mA/cm² (バンドギャップは1.0 eVに相当)を得る。さらに、これらのミドルセルを利用した3または4接合セルをシャープ(株)と共同して製作し、集光時の変換効率効率45 %を得る。</p>
6	20 ～ 22	高倍集光セル微細加工技術	東京大学	InGaP/InGaAs多接合セルに微細構造を活用した全波長域に対応する反射防止構造を形成し、高効率化を図る。また、小面積セルを単一基板上に集積直列接続し、高集光下でも直列抵抗の寄与を減じた高効率セルを作製する。さらにマイクロ集光システムとハイブリッド集積させたマイクロセルアレイを開発する。	<p>【22年度中間目標】 シャープ(株)が供給するⅢ-V化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域(400-1,300nm)の反射率を0.5%以下にすることで、従来の2層ARコート処理セルに対して、2%の短絡電流の向上を達成する。 シャープ(株)が供給するⅢ-V化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ(株)で配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。</p> <p>【26年度最終目標】 多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ(株)と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5,000倍集光下で変換効率40%を達成する。</p>
7	20 ～ 22	次世代プロセス技術開発(InGaN多接合セル)	東京大学	ドーピング制御された高品質・高In濃度InGaNを得ることを目的として、低温PSD成長法によるInGaNの相分離抑制技術の開発、及び、InGaN薄膜へのドーピング技術を開発する。最終的に、InGaN多接合セル実現のための基礎技術	<p>【22年度中間目標】 In組成0.5でX線回折半値幅0.12°以下の結晶性を持つInGaNを実現する。 In組成0.3でホール濃度5×10¹⁷/cm³以上のp型InGaNを作製する。</p>

				としてバンドギャップ2eV以下のInGa _N 単接合太陽電池を作製する。	【26年度最終目標】 バンドギャップ2eV以下のInGa _N 単接合セルを製作し変換効率7%を達成する。	
8	20 ～ 22	水素MBE法 (GaInNAs:Sb/量子ナノ構造)	東京大学	集光時変換効率45%の4接合タンデムセルを達成するために、1eV帯のサブセル材料としてGaInNAs:Sb 薄膜の開発を原子状水素援用分子線エピタキシー法(水素MBE法)により行う。また3接合タンデムセルのミドルセルに多重量子井戸や積層量子ドット構造等を導入した高効率化技術を開発する。	【22年度中間目標】 GaInNAs:Sb薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術(水素MBE法)を開発し、単接合セルで、非集光時変換効率15%を達成する。 3接合セルのGaAsミドルセルにInAs系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収によりIsc = 2mA/cm ² の増大を達成する(これは、1.75eVのトップセル下で16mA/cm ² に相当する)。 【26年度最終目標】 シャープ(株)と協力して4接合セルを製作して、集光時の変換効率45%を達成する。 シャープ(株)と協力して3接合セルを製作して、集光時の変換効率42%を達成する。	
9	20 ～ 22	MOVPE法 (GaInNAs/量子井戸構造)	東京大学	MOVPE法によりGaAs及びGe基板上GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造の長波長化(1eV帯)を行う。22年度までは、急速熱処理(RTA処理)による高品質化技術を中心に開発する。また、GaInNAs薄膜については、24年度までに単接合セルで変換効率15%を達成し、25年度よりシャープ(株)と協力して4接合セルを開発する。GaInNAs量子井戸構造については、24年度までに、長波長域(1eV)まで吸収端をのぼし、光電流を増大させ、25年度よりシャープ(株)と協力して3接合セルを開発する。	【22年度中間目標】 GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造において、X線半値幅0.1°以下およびPL半値幅25meV以下@10Kを達成する。 【26年度最終目標】 GaInNAs薄膜では、シャープ(株)と協力して4接合セルにおいて、集光時変換効率45%を達成する。 GaInNAs量子井戸構造では、シャープ(株)と協力して3接合セルにおいて、集光時変換効率42%を達成する。	
10	20 ～ 22	エピタキシャル成長技術開発(量子構造挿入型、格子整合型4接合)	シャープ(株)	第4項に同じ	第4項に同じ	
11	20 ～ 22	高倍集光セルの開発	シャープ(株)	セルの直列抵抗低減を意図した高倍集光用デバイス設計を行う。光学系一体型モジュールの実現のため集積化による高倍集光セルの開発検討を行う。	【22年度中間目標】 集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。 【26年度最終目標】 光学系一体化モジュールにおいて5,000倍集光時変換効率40%を達成する。	
①-3量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池						
12	20	量子ドット	東京大学	pn接合構造中に最適構造のミ	【22年度中間目標】	

	～ 22	超格子型		ニバンドを1つ追加した量子ナノ構造（中間バンド型）太陽電池（集光時変換効率の最高理論値60%）を実現する素子構造として、高密度、高均一で3次的に周期配列した量子ドット超格子（ドット結晶）を開発する。歪み補償成長法による中間バンド型量子ドット太陽電池の作製技術を開発し、ポンプ・プローブ法等により非線形光吸収過程の検証を行う。	サイズ揺らぎ10%、中間層膜厚10nm以下の量子ドット超格子（中間バンド）型太陽電池を作製し、2光子吸収過程の検証とセル効率12%を達成する。 【26年度最終目標】 量子ドット超格子（中間バンド）の製造技術を確認し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時変換効率15%を達成する。 量子ナノ構造（中間バンド型）タイプの太陽電池が変換効率40%越えを実現する設計技術を確認する。	
13	20 ～ 22	量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）	電気通信大学	量子ドット超格子太陽電池の開発において、良質な量子ドット超格子構造の作製技術の開発が重要な課題であり、化合物半導体量子ドットの高均一化・高密度化およびその積層化の基礎技術を開発し、量子ドット超格子太陽電池への応用開発を進める。	【22年度中間目標】 光吸収波長帯（1,000-1,300nm）を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を20meV以下に抑制し、かつ量子ドット密度を $6 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ 以上に高密度化するための成長技術を開発する。さらに、上記量子ドット構造の10層以上の多重積層化技術を開発する。 【26年度最終目標】 上記量子ドットの多重積層構造における不均一幅を25meV以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において15%以上の変換効率を達成する。	
14	20 ～ 22	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	新日本石油(株)	新概念太陽電池創出のため、有機半導体と量子ドットによる3次元超格子構造体を利用した中間バンド型太陽電池を開発する。具体的には、3次元超格子構造体の原料として、化合物系半導体量子ドットと有機半導体からなる量子ドット・有機半導体ハイブリッド材料を開発し、そのハイブリッド材料を利用した、3次元超格子構造の形成技術を開発することで、中間バンド生成と2光子吸収の実証を行う。	【22年度中間目標】 1.8-2.0eVのバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ1.0eV程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに2光子吸収の実証を行う。 【26年度最終目標】 量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率10%を達成する。	
15	20 ～ 22	光マネジメント（金属ナノ粒子）	東京大学	金属ナノ粒子を用いた光マネジメント技術の開発を行う。金属ナノ粒子が光を吸収すると光近接場を生じる効果を検証する。近接場は、ごく近傍に存在する光吸収体に効率的に光を伝達するアンテナの役目をすることによって、太陽電池が本来有する吸収率を大	【22年度中間目標】 金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5-2.5eV帯における光吸収係数が10%増強することを実証する。 【26年度最終目標】 金属ナノ構造を太陽電池に作りこみ、吸収係数の増加	

				きく増強させる効果が期待される。この効果を使って量子ドット型太陽電池が十分に光を取り込めるようにする。	が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。	
①-4ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池						
16	20 ～ 22	界面電荷移動遷移型セル	東京大学	金属酸化物とジシアノメチレン基を有する有機分子からなる界面錯体の光励起を動作原理（新概念）とするセルを実現することを目的とし、素材探索およびセル構造構築に向けた研究開発を行なう。 将来目標である超高効率多接合太陽電池の実現に向けては、本項目で研究開発を行なう界面電荷移動遷移型セル単独での実現を目指す一方で、他項目で開発する新概念/新接合セル(*)との組み合わせも視野に入れている。さらには、本項目の取組みの中で開発する1eV帯で光電変換可能な新概念セルを用いて、①-2,3の各項目で研究開発する無機系多接合セルを補強するなど、幅広い視点からの高効率化を目指す。	【22年度中間目標】 界面電荷移動遷移型セルを利用して、1eV帯領域で光電変換を達成する。 【26年度最終目標】 界面電荷移動遷移型セルで変換効率10%を達成する。	(*)ETA型セルあるいは、大阪大学と兵庫県立大学が中心となり開発する無機新材料および新接合技術により、従来の無機多接合太陽電池では、光電変換が困難であった領域での光電変換を目指す多接合型セル
17	20 ～ 22	新概念素子用ハイブリッド光電素材	東京大学	ETA型セルを中心に新概念や新接合光電変換素子の素材開発を行なうことを目的とし、光吸収、励起状態の寿命、ドナー/アクセプター材料とのエネルギーレベルマッチングおよび電荷注入速度などに着目し、可視から近赤外領域の幅広い光電変換を可能とするための光電変換材料の研究開発を行う。	【22年度中間目標】 電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池（ETA）において、新日本石油(株)に協力して、1.4eV帯および1.0eV帯でのETA構造素子を試作し光電変換を検証する。 【26年度最終目標】 新日本石油(株)に協力して、ETA構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネージメントの適用により、変換効率10%を達成する。	
18	20 ～ 22	多結晶化合物多接合太陽電池	大阪大学	新概念、新技術の太陽電池の研究開発の一部として、非Ⅲ-V族系化合物半導体材料による新規太陽電池の開発を目的に、その材料開発と、多結晶化合物半導体薄膜を用いた多接合太陽電池作製技術の実証を行う。 材料開発においては、その要素技術として、半導体薄膜の電気化学法および塗布法による形成技術を開発、トップセルに用いるバンドギャップが1.8-2.2 eVの半導体の開発、0.6 -1.2 eV領域のボトムセルの開発、ならびに、トップセルと連結したタンデム型太陽電池の開発を行う。	【22年度中間目標】 トップセル用のバンドギャップ1.8-2.2 eVの太陽電池材料を開発する。 バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生率の平均量子収率50%以上（溶液との接合による評価）を達成する。 擬似太陽光照射に対する変換効率3%以上を達成する。 【26年度最終目標】 0.6 -1.2 eV領域のボトムセルを開発する。 トップセルと連結したタンデム型太陽電池を開発し、変換効率15%以上を達成する	

19	20 ～ 22	ETA構造による新概念素子	新日本石油(株)	新概念太陽電池創出のため、ドナー/色素/アクセプター3元系によるETA構造素子を開発する。具体的には、ETA構造素子に適したドナー/色素/アクセプター3元系相分離構造材料を開発するとともに、中間目標までには素子化検討を行い、光電変換の基本コンセプトを実証する。	。 【22年度中間目標】 ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池(ETA)において、1.0eV帯および1.4eV帯でのETA構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。 【26年度最終目標】 ETA構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率10%を達成する。
20	20 ～ 22	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	新日本石油(株)	高度光利用技術創出のため、金属ナノ粒子アレイ構造を利用した光マネジメント材料を開発する。具体的には、金属ナノ粒子アレイ作製技術の開発と、太陽電池への組み込み技術を開発し、効率向上効果の実証を目指す。	【22年度中間目標】 金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA構造素子(又は他の光電変換素子)へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果により量子収率が10%増大することを実証する。 【26年度最終目標】 ETA構造による新概念素子に対して光マネジメントを適用し、変換効率10%を達成する。
21	20 ～ 22	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	東京大学	金属の種類や形状に依存する様々なプラズモン吸収を利用して、実現しうる光電変換能力を明らかにするために、光電変換の原理解明および系の最適化を進め、新概念セルを開発する。	【22年度中間目標】 光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。 【26年度最終目標】 金属ナノ粒子吸収型セルで10%を達成する。
22	20 ～ 22	ナローバンドギャップ太陽電池	兵庫県立大学	ナローバンドギャップ用光電変換材料としては、銅およびニッケルを中心とした元素を含む硫黄系およびセレン系ナノ結晶粒子を第一ターゲットとし、ドーパントを変化させることでバンドギャップコントロールを行なう。化学手法の特徴を生かし、効率良く系統的に材料の研究開発を行ない、それらのナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行うとともに、セル化技術の研究開発を行なう。 4接合太陽電池のナローギャップ領域での光電変換を可能とする第3、4ジャンクションセル、またそれらからなる2接合セルを開発する。	【22年度中間目標】 ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eVおよび0.6-0.7eVのバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。 【26年度最終目標】 ナローバンドギャップセルからなる2接合太陽電池を作製し、変換効率15%を達成する。

表 5. 研究開発項目別開発内容、目標①（平成 23～24 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
①-1集光型多接合太陽電池						
1	23～24	多接合太陽電池の評価解析	豊田工業大学	格子不整合系3接合セルにおける転位挙動の解析とそれに基づく転位密度低減を検討する。	<p>【24年度中間目標】</p> シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率45%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> シャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。InGaAsN単接合太陽電池で非集光時変換効率15%を得る。	
2	23～24	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学)	集光型太陽電池の電極パターンの最適化や太陽電池セル内部抵抗の解析を実施する。高倍率集光時におけるセル内の温度上昇(局所的含む)に起因する劣化を解析し、長期安定動作上限温度を明らかにする。また、その温度を維持するために必要な冷却構造を実現する。	<p>【24年度中間目標】</p> シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率45%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> シャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。InGaAsN単接合太陽電池で非集光時変換効率15%を得る。	
3	23～24	多接合セル開発(格子不整合系)	シャープ(株)	直列抵抗成分であるトップセルのシート抵抗、様々な層で構成されたヘテロ界面での抵抗、電極と半導体層の接触抵抗、受光面電極の抵抗等の低減に取り組む。短絡電流の増大をねらい、電流を律速しているトップセルの窓層高バンドギャップ化による短波長量子効率の改善、反射防止膜の広帯域化、コンタクト層の幅狭化によるシャドーロス低減等に取り組む。	<p>【24年度中間目標】</p> 逆積み3接合セルの構造と成長条件の最適化を進め、集光時変換効率45%(1,000倍集光時)を達成する。逆積み3接合セルに対して光学効率90%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> 4接合セル構造にて非集光時効率38%を達成し、集光時効率48%を達成する。逆積み3接合セルを用いたモジュールで変換効率35%を達成する。	
①-2多接合用新材料開発						
4	23～24	多接合セル開発(格子整合系新材料・ナノ構造)	シャープ(株)	逆積み3接合構造セルと低バンドギャップセル(Geセル等)をスタック化した4接合構造の検討を行う。InGaPトップセル/GaAs2番目セル(当社作製)とInGaAsN3番目セル/Geボトムセル(他グループ作製)をスタック化した4接合構造、量子ドットナノ構造を3番目セルに取り入れた4接合構造等の検討を行う。	<p>【24年度中間目標】</p> 逆積み3接合セルの構造と成長条件の最適化を進め、集光時変換効率45%(1,000倍集光時)を達成する。逆積み3接合セルに対して光学効率90%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> 4接合セル構造にて非集光時効率38%を達成し、集光時効	

					率48%を達成する。逆積み3 接合セルを用いたモジュール で変換効率35%を達成する 。	
5	23 ～ 24	量子井戸ミ ドルセル	東京大学	量子井戸を挿入してGeへの格子 整合と長波長化を両立する ミドルセルを、高スループット のMOVPEにより作製する。P による歪み補償を活用し、In GaAsあるいはInAsの積層量子 構造を挿入した1.0 eV帯セル の成長技術を確立する。	【24年度中間目標】 GaAs基板上量子井戸挿入単 接合セルで非集光時変換効 率20%を得る。項目4、8と連 携して、3接合セルのGaAsミ ドルセルにInGaAs/GaAsP量 子井戸を挿入し、トップセ ル(1.7eV)配置下で短絡電 流16mA/cm ² (1sun)を達成 する。 【26年度最終目標】 InGaAs/GaAsP量子井戸挿入3 接合セルの開発において、 項目4、8と連携して、変換 効率36%(1sun)、45%(1,0 00suns)を達成する。	
6	23 ～ 24	GaInNAsミ ドルセル(CBE)	豊田工業 大学	GaAsN材料中のN起因欠陥の解 明、およびCBE成膜中の表面 反応制御によるGaAsN材料の 高品質化をさらに進める。Ga InNAs材料の高品質化の研究 も進める。	【24年度中間目標】 GaInNAs単接合太陽電池にお いて、非集光時変換効率15% 、集光時変換効率18%を達成 する。 【26年度最終目標】 AlInGaP/InGaAs/GaInNAs(1 eV)/(GeまたはInGaAs)4 接合セルにおいて、非集光 時変換効率38%、1,000倍集 光時変換効率48%を達成する 。	
7	23 ～ 24	窒素系結晶 成長の理論 解析	豊田工業 大学 (再委託 :九州大 学)	原子レベルでの表面反応プロ セスの寄与の検討およびH、C などの不純物取り込み挙動を 明らかにする。不純物の混入 を抑制する成長条件を考察・ 提案し、材料の更なる高品質 化を行う。	【24年度中間目標】 GaInNAs単接合太陽電池にお いて、非集光時変換効率15% 、集光時変換効率18%を達成 する。 【26年度最終目標】 AlInGaP/InGaAs/GaInNAs(1 eV)/(GeまたはInGaAs)4 接合セルにおいて、非集光 時変換効率38%、1,000倍集 光時変換効率48%を達成する 。	
8	23 ～ 24	GaInNAsミ ドルセル(水 素MBE、MOVPE、量子 ドット添加)	東京大学	1eV帯のサブセル材料として 、GaInNAs:Sb 薄膜結晶を原 子状水素援用分子線エピタキ シー法(水素MBE法)により 開発する。MOVPE法によりGaA s及びGe基板上GaInNAs薄膜結 晶の長波長化及び高品質化を 図る。3接合タンデムセルの ミドルセルに積層量子ドット 構造を添加した高効率セル化 技術の開発を行う。	【24年度中間目標】 単接合セルで変換効率15%(1sun)を達成する。またGaA sミドルセル配置下で短絡電 流14mA/cm ² (1sun)を達成 する。4接合セルの第3・4セ ルにあたるGaInNAs:Sb/Ge 2 接合セルにおいて、短絡電 流7mA/cm ² (1sun)を実現す る。3接合セルのGaAsミドル セルにInAs/GaNAs系積層量 子ドットを挿入し、トップ セル(1.7eV)配置下で短絡 電流16mA/cm ² (1sun)を達 成する。	

					<p>【26年度最終目標】 GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率39% (1sun)、48% (1,000 suns) を達成する。量子ドット添加3接合セルの開発において、変換効率36% (1sun)、45% (1,000 suns) を達成する。</p>	
9	23 ～ 24	広帯域AlInGa _N 結晶を用いた多接合太陽電池	名古屋大学 (共同実施：名城大学)	サファイア及びGa _N 基板に加えて、Si基板上またはZnO基板上のGaInN結晶成長技術を開発する。	<p>【24年度中間目標】 単接合変換効率10%以上、多接合変換効率20%以上を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 単接合変換効率20%以上、多接合変換効率30%以上を達成する。</p>	
10	23 ～ 24	InGa _N 多接合セル新プロセス	東京大学	ドーピング制御された高品質・高In濃度InGa _N を得ることを目的として、低温PSD成長法によるInGa _N の相分離抑制技術の開発、及び、InGa _N 薄膜へのドーピング技術、及び、高品質ヘテロ構造作製技術を開発し、InGa _N 多接合セル実現の為の基礎技術としてバンドギャップ2eV以下のInGa _N 単接合太陽電池を作製する。	<p>【24年度中間目標】 InGa_Nを用いた電界制御型太陽電池構造を提案し、その有効性をスパッタ法による素子作成で実証する。また、スパッタ法を用いてIn組成0.3でキャリア移動度200 cm²/V・s以上のInGa_Nを作製する。</p> <p>【26年度最終目標】 スパッタ法でバンドギャップ2eV以下のInGa_N単接合セルを製作し変換効率7%を達成する。</p>	
11	23 ～ 24	ナローギャップボトムセル (Cu ₂ Te)	兵庫県立大学	新型低温溶融印刷型半導体Cu ₂ Teに熱耐久バッファ層を適用し、高効率印刷太陽電池の作製を行い、さらにドーピングを行うことで0.6-0.7eVのバンドギャップを持つ材料の作製を行う。0.6-0.7eVのナローバンドギャップ半導体窒化物を非真空法で作製する。	<p>【24年度中間目標】 非真空プロセスでのCu₂Te又は新型窒化物太陽電池により、短絡光電流7mA/cm²を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 非真空プロセスでのCu₂Te又は新型窒化物太陽電池により、短絡光電流14mA/cm²を達成する。</p>	
12	23 ～ 24	近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた3接合用ボトムセル構築	東京大学	無機ホール輸送材料の組成ならびに結晶性などを最適化し、キャリア移動度を向上させる。ナローギャップ材料としては、1,400nm級の波長領域での吸収が可能な近赤外吸収材料 (量子ドット、顔料等) の合成を行う。	<p>【24年度中間目標】 3接合太陽電池のボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時に、I_{sc}=12mA/cm²を得る。変換効率4%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 3接合セル、非集光下で変換効率30%を達成する。</p>	
①-3量子ドットマルチバンドセル						
13	23 ～ 24	量子ドット超格子セル	東京大学	pn接合構造中に最適構造のミニバンドを1つ追加した量子ナノ構造 (中間バンド型) 太陽電池 (集光時の変換効率の最高の理論値60%) を実現する素子構造として、高密度、	<p>【24年度中間目標】 量子ドットの微小化、また面内密度として10¹¹/cm²を有する50層積層量子ドット超格子セルの開発を行い、変換効率25% (低倍集光時) を</p>	

				高均一で3次的に周期配列した量子ドット超格子（ドット結晶）を開発する。	達成する。光閉じ込め構造を作り込み、量子ドット超格子セルの効率向上に定量的に反映されることを実証する。 【26年度最終目標】 量子ドット超格子（中間バンド）セルの製造技術確立し、光閉じ込め構造を取り入れたセルにおいて、変換効率27%（非集光）、40%（1,000倍集光）を達成する。
14	23～24	超高密度量子ドットセル	電気通信大学	分子線エピタキシー（MBE）による面内高密度InAs量子ドットの自己形成技術を開発し、面内高密度量子ドットにおける中間バンドの形成について検証する。また歪み補償層を導入した積層成長を開発し、面内高密度量子ドット層の多重近接積層法を確立する。	【24年度中間目標】 面内密度 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上を達成する。面内高密度量子ドットの5層積層構造を作製する。非集光時変換効率15%を達成する。 【26年度最終目標】 量子ドットマルチバンドセルを作製し、変換効率27%（1sun）、40%（1,000suns）を達成する。
①-4光マネジメントに資する微細加工技術開発					
15	23～24	マイクロ集積集光セル開発	東京大学	InGaP/InGaAs等の多接合セルに微細構造を施し、小面積セルを単一基板上に集積直列接続することにより高集光下でも直列抵抗の寄与を減じた高効率セルを作製する。さらにマイクロ集光システムとハイブリッド集積させたマイクロセルアレイを開発する。	【24年度中間目標】 多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を20%以下に抑えつつ、マイクロセルの10直列動作を達成する。 【26年度最終目標】 多接合集積直列セルの集光下動作により、モジュール変換効率35%を達成する。
16	23～24	光閉じ込め微細構造の開発	東京大学	量子ドット等ナノ構造による長波長領域の光吸収増大を達成してマルチバンドセル実現および効率向上に資する為、表面傾斜屈折率構造、裏面乱反射構造を光学理論に基づいて設計し、微細加工技術を駆使した試作により、その効果を実証する。さらに、ミクロンスケールの凹凸構造を有するpn接合により光の面内伝搬モードを利用した光閉じ込めを検討する。このために、III-V半導体の選択成長、低損傷の中性粒子ビームエッチング、高段差被覆性の製膜技術など、新たな微細加工技術を開発する。	【24年度中間目標】 セル表面・裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を3倍に増加させ、短絡電流の増大を実証する。 【26年度最終目標】 量子マルチバンドセルに光マネジメント技術を適用し、量子ナノ構造層における吸収量を10倍に増加させる。これにより、変換効率27%（非集光）、40%（1,000倍集光）の達成に資する。
17	23～24	表面修飾技術開発（ナノ構造修飾）	JX日鉱日石エネルギー(株)	セル表面に修飾構造を形成した際の光の伝播挙動と、セル内部の光吸収挙動をシミュレーションし、太陽電池性能を予測するシミュレーターの開発を行うとともに、900～1,3	【24年度中間目標】 量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900～1,300nmの領域の光の吸収量が3倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実

			00nmの波長域で光路長を増大できる修飾構造を設計する。表面凹凸構造を有する量子構造セルに修飾構造を組み込む為に、塗布法や自己組織化法などのナノ構造を作製する手法を検討する。	証する。 【26年度最終目標】 量子マルチバンドセルに光マネジメント構造を適用することで、量子ナノ構造層における吸収量を10倍に増加させる。	
--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------	--

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

本テーマでは、40%を超える高効率のために最適な複数のバンドギャップを有する高度秩序薄膜材料を新たに設計・創製する。それら新材料をシリコン系 3 接合および化合物系 4 接合デバイスに適用し、波長選択型導電層を介して 2 端子メカニカルスタック太陽電池を形成する。また光マネジメント技術、多重エキシトン生成、二光子利用技術などの新原理検証についても検討を行う。開発された新材料は最終的に最適なものを選択して相互に利用する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

平成 22 年度中間目標

シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率 20%に資する。

平成 24 年度中間目標

ボトムセルおよびトップセルの要素材料の開発並びにデバイス化を行う。また高度光利用技術、スマートスタック技術を開発し、多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。

平成 26 年度最終目標

ボトムセルおよびトップセルについて要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。

表 6. 研究開発項目別開発内容、目標② (平成 20～22 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
②-1シリコン系3接合太陽電池の開発						
1	20～22	高配向性平面ポリシラン材料の開発	産業技術総合研究所	平面ポリシラン薄膜を用いて高効率多接合太陽電池に適したシリコン系トップセルを開発する。この開発のために、バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシランの薄膜作製技術開発と物質・薄膜・デバイス特性の実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。	
2	20～22	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	東京農工大学	量子サイズナノ結晶シリコンにおけるバンドエンジニアリングとヘテロ接合界面の欠陥低減と電気的特性向上という当グループが蓄積してきた二つの知見を発展させ、太陽電池の革新に不可欠なバンドギャップ制御に取り組み、最適ワイドバンドギャップトップセル用材料形成のための要素技術開発と実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の単接合nc-Si太陽電池で変換効率10%を達成する。その際の実験値としては、FF=0.8、Voc=0.7 V、Isc=18 mAを目標とする。	
3	20～22	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	高効率多接合太陽電池に用いるシリコン系ボトムセルの高効率化を目指して、高品質結晶系ナローギャップ材料の開発、精密制御ヘテロ接合の開発を行い、太陽電池試作を通じて開発した技術を実証する。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ0.9eVのシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命100 μ s、ヘテロ界面再結合速度1000cm/sを目標とする。	
4	20～22	シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発	産業技術総合研究所	シリコン-ゲルマニウム-スズを用いた高効率多接合太陽電池に適したシリコン系ボトムセルの開発を目的として、シリコン-ゲルマニウム-スズ系擬単結晶作製技術開発とそれを用いた太陽電池作製によるデバイス実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度10 ¹⁶ /cm ³ を目標とする。	
					<p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率12.5%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合nc-Si太陽電池で変換効率12.5%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ0.9eVのシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度10 ¹⁵ /cm ³ を目標とする。	

5	20 ～ 22	ガラス基板 上のシリコ ン・ゲルマ ニウム等単 結晶シード 層形成技術	コーニン グホール ディング ジャパン 合同会社	透明なガラス基板のシリ コン等の単結晶薄膜を基板と して用い、当該シリコン等単結 晶薄膜上にエピタキシャルに よる単結晶成長を行う事によ り、低欠陥のシリコン・ゲル マニウム等の狭バンドギャ ップ単結晶シード層薄膜を開 発する。本項目では、ガラス 上単結晶シリコン等薄膜を、 太陽電池用に適した膜厚まで 成長させるエピタキシャル技 術と、成長に適した基板の要 件を探索する。	<p>【22年度中間目標】 シリコン・ゲルマニウム等 単結晶薄膜を単結晶シード 層としたバンドギャップ0.9 eVの単接合太陽電池で変換 効率8%を達成する。その要 素技術として単結晶薄膜の 転位密度として$10^8/cm^2$を 目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 シリコン・ゲルマニウム等 単結晶薄膜を単結晶シード 層としたバンドギャップ0.9 eVの単接合太陽電池で変換 効率10%を達成する。その 要素技術として単結晶薄膜 の転位密度として$10^7/cm^2$ を目標とする。</p>	
6	20 ～ 22	ゲルマニ ウム系単結 晶エピ成長 技術の開発	東京工業 大学	変換効率40%を目指すSi系3接 合薄膜太陽電池の開発に資す るボトムセル用ナローギャ ップ太陽電池材料として、Si基 板上へのGeの低温エピタキシ ャル成長技術の開発とそれを 用いたナローギャップヘテロ 接合太陽電池技術の実証を行 う。	<p>【22年度中間目標】 SiとGe単結晶薄膜のヘテロ 接合を用いたボトム用単接 合太陽電池で変換効率8%を 達成する。その要素技術と してGe単結晶薄膜のキャリ ア拡散長としてGeエピタキ シャル膜のウエハレベルで の膜厚と同程度（キャリア 寿命$10\mu s$）を目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 ガラス基板上に形成した単 結晶Si基板上に単結晶Ge薄 膜を活性層として作製した ボトムセル用ヘテロ接合型 太陽電池で変換効率10%を 達成する。</p>	
7	20 ～ 22	フッ素系イ オン制御プ ラズマプロ セスの開発	東北大学	HIT太陽電池におけるアモル ファスパッシベーション時の ダメージ等に代表される欠陥 生成によるデバイス劣化を 抑制するため、気相および表 面において荷電粒子の物理 的衝撃および紫外線照射を 抑制できるビーム技術を使 用して、気相反応および表 面反応の高精度制御が実 現できる薄膜成長技術を 検討する。フッ素中性粒 子ビーム、フッ素負イ オンビームあるいは水素 中性粒子ビーム、水素 負イオンビームを用い てシラン系ガス（Si H ₄ 、SiF ₄ ）およびゲル マン系ガス（GeH ₄ 、 GeF ₄ ）との気相反 応および表面反応を制 御することにより、 プラズマ気相成長法に 比べ低温で欠陥や不 純物の少ない結晶質 ゲルマニウム系薄膜 成長の可能性実証 を行う。	<p>【22年度中間目標】 産業技術総合研究所と協 力してバンドギャップ0.9eV のGeあるいはSi/Geに よる単接合太陽電池で 変換効率8%を達成す る。その要素技術とし て成長温度400℃以下 でバンドギャップ0.9eV の結晶質ゲルマニウム 系薄膜で欠陥密度（ ダングリングボンド密 度）を$10^{16}/cm^3$台と することを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 産業技術総合研究所と協 力してバンドギャップ0.9eV のGeあるいはSi/Geに よる単接合太陽電池で 変換効率10%を達成 する。その要素技術と して成長温度400℃以 下でバンドギャップ0.9eV の結晶質ゲルマニウム 系薄膜で欠陥密度（ ダングリングボンド密 度）を$5 \times 10^{16}/cm^3$ 以下とすることを目標 とする。</p>	

8	20 ～ 22	擬単結晶固相成長技術の開発	東海大学	シリコン系ナローギャップ材料の開発として、金属誘起結晶化によるゲルマニウム及び高ゲルマニウム組成シリコンゲルマニウムの大粒化を目指し、結晶構造、電気的特性の最適化を検討する。得られた大粒径薄膜をシード層とし、擬単結晶光活性層を形成する。これにより高効率多接合太陽電池に適したボトムセルを開発する。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVの擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、波長1,000nmで30%以上の分光感度を目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVの擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、波長1,000nmで50%以上の分光感度を目標とする。</p>
9	20 ～ 22	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所 三菱重工業(株) 京セラ(株)	単接合トップセル、単接合ミドルセルならびに単接合ボトムセルを組み合わせることで、メカニカルスタックシリコン系3接合太陽電池を実現する。このための要素技術として、単結晶あるいは擬単結晶シリコン-ゲルマニウム-スズ薄膜を用いたナローギャップセルの温度係数を改善し、高温でも発電効率の低下を防ぐヘテロ接合を有する太陽電池デバイスを開発する。なお、シリコン系材料のみならず、化合物系材料も視野に入れ、トップセル、ミドルセル、ボトムセルそれぞれに最適な材料を選択する。さらに、3接合太陽電池の作製には、他チームで開発するメカニカルスタック技術を取り入れる。また、高度光閉じ込め技術も取り入れることにより、高効率化を図る。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVのシリコン-ゲルマニウム、シリコン-ゲルマニウム-スズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率8%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ0.9eVの単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。</p>
②-2化合物系4接合薄膜太陽電池の開発					
10	20 ～ 22	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	産業技術総合研究所	Cu(In _{1-x} Ga _x)(S _y Se _{1-y}) ₂ 系材料(CIGSSe)を用いて高効率多接合太陽電池に適した化合物系トップセルを開発する。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命1ns以上、開放電圧0.9V以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率90%以上を得ることを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>バンドギャップ1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。</p>
11	20 ～ 22	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	パナソニック電気(株)	化合物系ワイドギャップ材料を用いたトップセルの高効率化を目的として、光吸収層のバンドギャップ分布制御、窓層-光吸収層の界面制御、裏	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率9%を達成する。その要素技術として、硫化物系</p>

				面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。	薄膜のキャリア寿命1ns以上、開放電圧0.9V以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率90%以上を得ることを目標とする。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。
12	20～22	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	超高効率多接合太陽電池の開発においては、ワイドギャップ材料である第1セルの高効率化が重要である。ワイドギャップ材料として有望なInGaP系等のエピタキシャル薄膜成長技術を開発し、高効率多接合太陽電池に適したトップセルを開発する。特にこれまでに報告例の無い $In_xGa_{1-x}P/GaP$ 量子ナノ構造太陽電池を開発し、その動作実証を行う。また、本拠点で既に確立している高度なGaAs/(In)GaAs量子ドット作製技術を用いて、量子ドット太陽電池の吸収波長帯を長波長帯に大幅に拡大するとともに、ドット中のサブバンド間エネルギーを制御し中間バンドの設計技術を高度化することにより、太陽電池の高効率化を目指す。	【22年度中間目標】 バンドギャップ1.8eV以上系太陽電池での変換効率9%を達成する。その要素技術として、ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命1ns以上、拡散長0.3 μ m以上。1.9eV以上（波長650nm以下）で光吸収を持つ（量子効率3%以上）GaP基板上 $In_xGa_{1-x}P$ 量子ドット太陽電池の作製。 10層以上のInAs量子ドット超格子を形成し、顕微PL測定により、中間バンド形成が出来ていることを確認する。In(Ga)As系量子ドット太陽電池において波長1,100nmで量子効率で10%以上を達成する。 【26年度最終目標】 InGaP/GaP量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。 InAs、InGaAs系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。
13	20～22	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	物質・材料研究機構	化合物系半導体をベースにした4接合型太陽電池を用いてタンデム型太陽電池の高性能化を図ることを目的として、トップセルとして酸窒化物系ワイドギャップ材料のバンドギャップ制御および価電子帯制御に関する要素技術開発とトップセルとしての太陽電池特性を向上させる技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 バンドギャップ2.8eV程度のInGaNを用いた太陽電池において変換効率5%を達成する。そのための要素技術として2.8eV程度のInGaNで、1nsのライフタイム、InGaNをp型化し、キャリア濃度 $1 \times 10^{18}/cm^3$ 【26年度最終目標】 バンドギャップ2.5eV程度のInGaNを用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。そのための要素技術として2.5eV程度のInGaNで5nsのライフタイムを目標とする。
14	20～22	酸化物ワイドギャップ材料の開発A	東京工業大学	バンドギャップが $\sim 2eV$ の酸化物半導体を新たに探索し、これを用いた高エネルギー領域の太陽光に対応する太陽電池の開発を目的とし、酸化物半導体の探索とその欠陥密度	【22年度中間目標】 高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ $\sim 2eV$ の太陽電池で変換効率5%を達成する。その要素技術として、結晶シリ

				の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。	コンよりもイオン化ポテンシャルが0.5eV以上大きいバンドギャップが~2eVのp型酸化物半導体で裾状態密度 $10^{19}/\text{cm}^3$ 以下を目標とする。 【26年度最終目標】 ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率12%を達成する。
15	20 ～ 22	酸化物ワイドギャップ材料の開発B	豊橋技術科学大学	光吸収層用高品質ワイドバンドギャップ酸化物材料ならびに多接合型太陽電池トップセルを開発することを目的として、 $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ 系ならびに $\text{Cu}^{1+}\text{-Ag}^{1+}\text{-O}$ 系光吸収層用高品質酸化物材料の電気化学的形成技術、 $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{1+}$ ならびに Cu/Ag 比制御によるバンドギャップ制御技術などの要素技術を開発すると共に、多接合型太陽電池トップセルに好適なバンドギャップ1.7-1.8eV程度の $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ならびに Cu-Ag-O 層を用いた単接合太陽電池を形成し、ワイドバンドギャップ酸化物材料、バンドギャップ制御技術ならびに高品質化技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率5%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ1.7-1.8eVの $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O} \cdot \text{Cu-Ag-O}$ 単一配向膜を実現し、これを用いて0.8Vの開放電圧を目標とする。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ1.7-1.8eVの $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O} \cdot \text{Cu-Ag-O}$ 単一配向膜にて移動度 $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}^1$ を目標とする。
16	20 ～ 22	化合物系タンデムセルの開発	産業技術総合研究所	メカニカルスタック型及びモノリシック型の化合物系多接合太陽電池の作製技術を開発し、太陽電池の高性能化を図ることで、全体目標の達成を目指す。	【22年度中間目標】 化合物多接合太陽電池で変換効率20%を達成。Ge基板上でバンドギャップ1.0-1.4eVのCIGS系太陽電池により変換効率13%を達成。 【26年度最終目標】 化合物多接合太陽電池で変換効率25%を達成。
②-3新概念新材料の検討					
17	20 ～ 22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	ナノシリコン結晶と高分子の混合物を用いた太陽電池で多重励起子の生成による超高効率太陽電池の作製を目的として、ナノシリコン/ナノカーボン複合材料における多重励起子生成の原理検証と本材料を用いた新概念太陽電池開発によるデバイス実証を行う。	【22年度中間目標】 閾値エネルギー-2.5Eg (Egはバンドギャップエネルギー)以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5Eg$ の光に対して励起子生成の量子収率150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5Eg$ の光に対して入射光強度のn乗 ($n \geq 1.2$) の依存性を有する光電流を実現する。 【26年度最終目標】 Siナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率10%を達成する。
18	20 ～ 22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の開発	産業技術総合研究所	半導体単層カーボンナノチューブ (CNT) を活用することにより、従来にはない優れた特性を有する高効率太陽電池の	【22年度中間目標】 半導体CNTの純度を90%以上まで向上させる。CNTのバンドギャップを遠赤外域の0.2

		陽電池の検討B		実現を目指す。具体的には、半導体単層CNTの特異な形状・構造・光・電子特性を利用して広い波長範囲で光電変換機能を実現する。更に、半導体単層CNTを用いた太陽電池で多重励起子の生成を検証し、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。	-1.3eVの範囲で制御し、0.1-0.5Vの開放電圧を達成する。バルクヘテロ接合CNT太陽電池の量子効率の最大値を50%以上とする。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$ の光入射において、1光子の吸収において2個以上の電子-正孔対の生成を確認する。 【26年度最終目標】 CNTを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。
19	20～22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討C	九州大学	ナノ結晶シリコン中でバンドギャップの2倍以上の光子エネルギーの光子1個で2個以上の多重励起子を生成できることを利用して、シリコン中で生じる多重励起子生成を利用した太陽電池の開発を目的として、励起子を高効率に電子と正孔に分離し電流として外部に取り出すために、マイクロpin接合シリコン材料を作製し、これを用いて多重励起子生成と光電流の取り出しが可能であることを実証する。そして、多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。	【22年度中間目標】 閾値エネルギー $2.5E_g$ (E_g はバンドギャップエネルギー)以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の n 乗 ($n \geq 1.2$) の依存性を有する光電流を実現する。 【26年度最終目標】 多重励起子太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して光電流量子収率100%以上を目標とする。
20	20～22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討D	東北大学	アルカリ-フラーレン、アルカリ-ハロゲン等の異種異極性イオンプラズマ中の基板バイアス法によって形成された強固なn型半導体CNT、強固なp型半導体CNT、pn接合内蔵CNT等の進化CNTを利用した新概念太陽電池を検討する。進化CNTの中で強固なn型半導体CNTと強固なp型半導体CNTを各々p-Siとn-Siに薄膜状で密着させてヘテロ界面上にpn接合を形成するヘテロ界面CNT太陽電池および電極間に単独1本のpn接合内蔵CNTのみを架橋させるpn接合内蔵CNT太陽電池を検討する。それぞれにおいて、擬似太陽光及び近赤外領域の光照射下での電圧-電流曲線測定等の特性評価、及びCNTのバンドギャップの3倍以上のエネルギーの光を入射することによる多重励起子生成を利用した太陽電池特性発現の原理実証を行う。高効率化を目的とし、束状進化CNTを一定間隔で2次的、3次的に分散整列した場合の太陽電池を評価する。	【22年度中間目標】 CNTの構造制御により E_g を0.2-1.3 eVの範囲で制御し、 $V_{oc}=0.1-0.5V$ を達成する。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$ の光入射において、ヘテロ界面及びpn接合内蔵CNTを用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1光子吸収2個以上電子-正孔対形成を確認する。) 【26年度最終目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率10%を達成する。
21	20～	単結晶有機半導体を用	産業技術総合研究	有機半導体単結晶薄膜の形成技術を開発し、有機半導体単	【22年度中間目標】 有機/無機ヘテロ接合セルで

	22	いた新概念太陽電池の検討A	所	結晶を用いた太陽電池が将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。これまでの有機半導体を用いた太陽電池はアモルファスやせいぜい微結晶混合状態であり、有機半導体の励起子拡散や電荷輸送において損失が大きく十分な変換効率が得られていないと考えられる。そこで、不純物や欠陥の少ない有機単結晶薄膜でヘテロ接合を形成することで、従来値を覆す高い変換効率の有機太陽電池の創出の可能性を模索する。そのために、まず不純物・欠陥の極めて少ない有機単結晶薄膜を超高真空中で成長させる技術を開発する（単結晶性有機薄膜形成技術）。また、有機単結晶薄膜を太陽電池へ実装するために、有機単結晶薄膜の無機基板へのヘテロ接合の形成技術を開発する（有機/無機ヘテロ接合形成技術の開発）。	変換効率1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$ を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100 nmを目標とする。 【26年度最終目標】 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$ を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で1 μ mを目標とする。		
	22	20 ～ 22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討B	東京工業大学	薄膜気相成長に溶液プロセスを導入したフラックス気相成長法を新たに用いた太陽電池用有機半導体材料の革新的高品質化プロセスの開発により、励起子拡散長の飛躍的増大、および接合界面での電圧損失の抑制による開放電圧の向上を試み、有機半導体材料が変換効率40%を達成するためのキーマテリアルとなる可能性を検証する。	【22年度中間目標】 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$ を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100 nmを目標とする。 【26年度最終目標】 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$ を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で1 μ mを目標とする。	
	23	20 ～ 22	強関連材料を用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	1eV以下のバンドギャップを有する分子化合物半導体を用いた太陽電池において、低エネルギーフォトンの有効利用と、高エネルギーフォトンによる多重励起子の生成の検証により、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討することを目的として、飛躍的な効率向上とコスト低減を目指したショットキー接合型/ヘテロ接合型セルの開発と広帯域フォトン有効利用の実証を行う。	【22年度中間目標】 有機強関連ヘテロ接合太陽電池を作製し、1eV以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として5%以上、2eV (>2 E_g) 以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率200%以上を達成する。 【26年度最終目標】 有機強関連ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。	
	24	20 ～ 22	強関連材料を用いた新概念太陽電池の検討B	理化学研究所	強関連材料の電荷秩序光崩壊による多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。酸化系材料における電荷秩序相が光照射により崩壊して金属相に相転移する現	【22年度中間目標】 強関連ヘテロ接合太陽電池を作製し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として5%以上を達成する。ポンプ-プ	

				象に着目し、1光子あたり複数個のキャリアが生成する可能性を実証し、接合の内部電界により電子と正孔とに分離する機構について、その原理を理論的に構築するとともに実験的に検証する。また、この原理に好適な材料を設計し、多重キャリア生成を利用した太陽電池を開発する。	ロープ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長光照射下での量子効率の増幅率として2倍以上を目標とする。 【26年度最終目標】 強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、p,n層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧0.5V以上を目標とする。	
25	20 ～ 22	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	産業技術総合研究所	金属ナノ材料とナノ半導体材料を組み合わせて、構造制御した金属ナノ粒子の光学非線形特性に着目した新概念太陽電池を開発することを目的として、高効率太陽電池としての要素技術開発とプラズモン電荷分離技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率1%を達成する。そのための要素技術として、拡散長100nmを目標とする。 【26年度最終目標】 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。そのための要素技術として、拡散長10 μ mを目標とする。	
②-4高度光利用技術の開発						
26	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発A	産業技術総合研究所	異なる太陽電池のメカニカルスタックを目的として、接合技術の開発と接合による2端子型太陽電池の製造技術の開発を行う。	【22年度中間目標】 分光感度の異なる2種類の太陽電池を接合させ、2端子セルとする際に、接着抵抗0.5 Ω /cm ² 以下、接着部の透過率90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの80%以上の電流密度を得る。 【26年度最終目標】 メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率25%を達成する。	
27	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発B	東京農工大学	高融点無機半導体太陽電池から有機半導体太陽電池まで多種類の材質の太陽電池間の接合を実現するために太陽電池多接合用透明導電接着フィルム(T-ACF)要素技術開発とその実証を行う。	【22年度中間目標】 T-ACFで接着抵抗0.5 Ω /cm ² 以下、実効屈折率1.8-2.0、実効消光係数3-5 $\times 10^{-5}$ 、光透過率70%を達成する。 【26年度最終目標】 T-ACFを用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。	
28	20 ～ 22	高度光閉じ込め技術の開発A	産業技術総合研究所	薄膜多接合太陽電池の高効率化にとって極めて重要な光マネジメント、すなわち各発電層における光吸収の促進、ならびに入射光の各発電層間への効率的な分配を実現するこ	【22年度中間目標】 周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。その要素	

				とを目的として、多接合太陽電池の最裏面に用いる光散乱基板（フォトリソグラフィ）と、個別の発電層間を繋ぐための波長分別機能を有した中間層（フォトリソグラフィ導電膜）を開発する。	技術として、半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量50%以上を目標とする。多層構造を利用した新規なフォトリソグラフィ導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長分別率を50%向上させる。 【26年度最終目標】 周期構造を利用したフォトリソグラフィ基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。	
29	20～22	高度光閉じ込め技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いたプラズモン効果を基盤技術として、新規な透明導電層を形成し、テイラーメイドな散乱波長選択性を有する多接合型太陽電池用の高機能透明導電層を開発する。特に、プラズモン活用による光散乱波長選択制御技術検証に注力する。	【22年度中間目標】 プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を20%向上させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。 【26年度最終目標】 新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を30%向上させる。	
30	20～22	高性能透明導電膜の開発	産業技術総合研究所	幅広い波長領域に感度を有する高効率太陽電池に必要な窓電極の開発を目的として、透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化と高い透明性と高い導電性を兼ね備えた低エネルギー損失窓電極の材料開発を行う。	【22年度中間目標】 可視・近赤外領域（波長400-1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下、波長1,700nmにおける吸収係数 $6.0 \times 10^3 / \text{cm}$ 以下を同時に達成する。200℃以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。 【26年度最終目標】 本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、変換効率25%を達成する。	
31	20～22	高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発	東京工業大学	酸化物表面の原子レベル構造制御技術を使って、ナノスケールで規則的な凹凸を持つナノ秩序表面構造ガラス基板を作製し、その上での均一な透明導電膜の結晶成長によって、25%以上の変換効率を有する薄膜多接合型太陽電池における高性能透明導電膜を開発することを目的として、ナノパターンガラス基板作製および透明導電性薄膜の高品質結晶成長に関する要素技術開発を行う。	【22年度中間目標】 ナノパターンガラス基板（1cm角以上）上での透明導電膜において、従来（例えばSnO ₂ ）に比して、おおむね2倍の移動度（80-100cm ² /V・s）および半分の電気抵抗率（ $2 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ ）を達成する。 【26年度最終目標】 ナノパターンガラス基板（10cm角以上）上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。	

表 7. 研究開発項目別開発内容、目標② (平成 23～24 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発						
1	23～24	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所	透明導電膜同士の接合技術を開発する。また、導電性微粒子を含有し、電気・光学的接合を可能とする樹脂フィルムの製造技術を具体化し、導電性微粒子および樹脂の材料を検討する。前記フィルムと太陽電池の電氣的接続を行う透明導電膜の開発もあわせて行う。またファンデルワールス力等による直接接合技術なども検討する。	<p>【24年度中間目標】 接着抵抗$2\Omega\text{cm}^2$以下、吸収損失10%以下の接合技術を開発する。接合技術を多接合太陽電池に適用し、変換効率20%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 接合技術の高度化により多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。</p>	
2	23～24	メカニカルスタック技術の開発	東京農工大学	透明導電性接着剤について、接合抵抗低減を目的として、ITOあるいはZnOの粒径均一化とプラズマ酸化還元法を用いた導電率制御を検討する。4インチサイズの接合プロセス技術を開発する。特に低温、低圧接合条件を開発する。金属粒子を用いたACFの低温、低圧大面積接合条件を開発する。開発した接着剤の試験を実用レベルのセルを用いて行い、熱サイクル等環境安定性の特性を取得する。	<p>【24年度中間目標】 接着温度150°C以下、接着圧力$0.5\text{MPa}/\text{cm}^2$以下、接合面積4インチサイズ、接合抵抗$2\Omega\text{cm}^2$以下を達成する。環境安定性として$-20\sim 100^\circ\text{C}$のヒートサイクル100回で特性評価を行う。</p> <p>【26年度最終目標】 接着温度130°C以下、接着圧力$0.3\text{MPa}/\text{cm}^2$以下、接合面積4インチサイズ、接合抵抗$1.5\Omega\text{cm}^2$以下かつ光透過率80%以上（波長域$500\sim 1,300\text{nm}$）を達成する。環境安定性として$-30\sim 130^\circ\text{C}$のヒートサイクル1,000回で特性評価を行う。</p>	
3	23～24	ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	三菱重工業(株)	単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を光電変換層に用いたナローギャップセルの温度係数を改善し高温でも発電効率の低下を防ぐ界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発する。	<p>【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eV以下の単接合太陽電池の変換効率9%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eV以下の単接合太陽電池の変換効率10%を達成する。</p>	
4	23～24	ヘテロ接合デバイス化技術の開発B	京セラ(株)	バンドギャップ 0.9eV のシリコン-ゲルマニウム、シリコン-ゲルマニウム-スズなどの基板を用いて、低ダメージ成膜にてヘテロ接合技術開発及びヘテロ接合材料の絞込みを行い、バンドギャップ 0.9eV 基板に対して最適なヘテロ接合条件を確立する。	<p>【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eVの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率9%を達成する。その際の特性値として、開放電圧0.3V以上を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ0.9eVの単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。</p>	
5	23～24	高度光利用技術の開発A	産業技術総合研究所	光閉じ込め効果を向上させたフォトニック基板を開発する為の新規材料及び新規構造を検討する。また、上記基板の	<p>【24年度中間目標】 相対変換効率向上15%以上を達成する。</p>	

				特性を補う高度光利用技術の開発も実施する。	【26年度最終目標】 メカニカルスタックセルで 相対変換効率向上20%以上を 達成する。	
6	23 ～ 24	高度光利用 技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いたプラズ モン効果を基盤技術として、 新規な透明導電層を形成し、 テイラーメイドな散乱波長選 択性を有する多接合型太陽電 池用のプラズモン散乱基板を 開発する。	【24年度中間目標】 単接合薄膜太陽電池におい て、従来技術に較べて15%以 上の変換効率向上を達成す る。 【26年度最終目標】 本技術を用いて産業技術総 合研究所等と協力して、メ カニカルスタック太陽電池 で相対変換効率20%向上を達 成する。	
②-2ボトムセルの開発						
7	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発A	産業技術 総合研究 所	SiGe系エピタキシャル薄膜中 の不純物密度の低減を図ると ともに、傾斜バッファ層の利 用などにより成長時の初期層 、膜成長法の改善を行い、薄 膜中の転位密度を低減する。 短絡光電流の向上に加え、開 放電圧の向上にも着目してSi Ge系薄膜ヘテロ接合太陽電池 の特性向上を図る。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eV以下の 単接合太陽電池セルで変換 効率9%以上を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eVの単接 合太陽電池セルで変換効率1 0%を達成する。	
8	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発B	コーニン グホール ディング ジャパン 合同会社	結晶成長装置の改良を行って 、SiGe等単結晶薄膜のエピタ キシャル成長の安定性や均一 性の向上を図り、不要な不純 物密度を1桁程度以上低減す る。SiまたはGe単結晶基板上 にバンドギャップ0.9eV以下 のSiGe等単結晶薄膜のボトム セルを作製し、変換効率の向 上に最適なエピタキシャル成 長条件を見出す。ガラス上Si 等単結晶基板上のエピタキシ ャル成長SiGe等単結晶薄膜中 の転位密度を低減する目的で 、傾斜組成や低温成長のバッ ファ層を挿入する。	【24年度中間目標】 ガラス基板上SiGe等単結晶 薄膜を基体としたバンドギ ャップ0.9eV以下の単接合太 陽電池で、変換効率9%を達 成する。その要素技術とし て、単結晶薄膜の転位密度 として $5 \times 10^7 / \text{cm}^2$ 以下を達 成する。 【26年度最終目標】 ガラス基板上SiGe等単結晶 薄膜を基体としたバンドギ ャップ0.9eV以下の単接合太 陽電池で、変換効率10%を達 成する。その要素技術とし て、単結晶薄膜の転位密度 として $1 \times 10^7 / \text{cm}^2$ 以下を達 成する。	
9	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発C	東京工業 大学	Si基板におけるGeの成長界面 の形成法に着目し、基板近傍 での貫通転移の抑制に必要な 条件や処理方法を開拓し、Si 基板上的Geエピ膜の高品質化 をはかる。Si ₂ H ₆ 、SiH ₄ を用い てSi基板に p-、または、n -Geヘテロエピ膜を作製し、a -Si:Hを用いたHIT型太陽電 池を試作する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eV以下で 変換効率9%を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eV以下で 変換効率10%を達成する。	
10	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発D	東海大学	島状結晶を核とした擬単結晶 SiGeの成長を検討する。固相 成長の出発材料である非晶質 SiGeの特性や作成条件につい て最適化を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eVの擬単 結晶Ge等を用いた太陽電池 で変換効率9%を達成する。 要素技術として、粒径5μm 以上の単一配向シード層を	

					得る。 【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eVの擬単結晶Ge等を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。エミッター層としての機能を兼ねる粒径5 μ m以上の単一配向シード層を得る。	
11	23 ～ 24	有機単結晶材料ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	p型半導体としてルブレンおよびテトラセン、n型半導体としてフラーレンを用いた単結晶接合技術を確立する。その為に、ルブレンおよびテトラセン単結晶上でのフラーレン結晶のエピタキシャル成長による接合形成技術、Si単結晶等の上でのエピタキシャル成長を利用した有機単結晶の接合形成技術を開発する。	【24年度中間目標】 有機単結晶を用いた単接合太陽電池で変換効率4%を達成する。 【26年度最終目標】 有機単結晶材料を用いた単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。	
12	23 ～ 24	有機単結晶材料ボトムセルの開発B	東京工業大学	ナノパターンを施した表面ナノ構造制御ガラス基板（1cm角以上）を作製する技術を確立する。ツイインレーザ型有機フラックス製膜装置を用いて、太陽電池効率として、マルチエキシトン効果が期待される有機電荷移動錯体の高品質単結晶・薄膜を作製するプロセスを確立する。	【24年度中間目標】 p型、n型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を作製し、変換効率4%を達成する。 【26年度最終目標】 p型、n型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を作製し、変換効率10%を達成する。	
13	23 ～ 24	ナノ材料系ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	高純度（99%以上）半導体単層CNTの大量抽出の為に分散・分離・抽出・濃縮の方法を向上し、連続・循環型高度分離方法の開発を行う。抽出した高純度半導体CNTからドーピングによりp/n型の半導体CNTを形成し、ヘテロ接合またはバルクヘテロ接合薄膜太陽電池の作製・評価を行う。半導体CNTにおける、多重励起子や多重キャリア（MEG）効果を実証する。	【24年度中間目標】 高純度（99%以上）半導体CNTの抽出率20wt%以上を達成する。CNT利用太陽電池の変換効率4%以上を達成する。半導体単層CNTで多重励起子や多重キャリア（MEG）効果を確認する。 【26年度最終目標】 高純度（99%以上）半導体CNTの抽出率30wt%以上を達成する。CNT利用太陽電池の変換効率10%以上を達成する。	
14	23 ～ 24	ナノ材料系ボトムセルの開発B	東北大学	「ヘテロ界面CNT太陽電池」については、短絡電流を増加する為にCNT薄膜の密度を増加させる。また、直列抵抗を低減する為に、CNTと電極との接触面積を増加する。「pn接合内蔵CNT太陽電池」については、単独1本のCNTのみならず複数本の束状のpn接合内包CNTを電極間に架橋する技術を開発する。	【24年度中間目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率4%を達成する。明確な多重励起子生成（MEG）効果を確認する。 【26年度最終目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率10%を達成する。	
15	23 ～ 24	強相関材料ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	積層化に必要な薄膜高均質化を達成する為の各種の気相成長法（真空蒸着法・物理気相成長法）、液相成長法（ラングミュアブロッケット法・インクジェット印刷法）による	【24年度中間目標】 有機強相関材料を用いた積層型ヘテロ接合素子を作製し、1eV以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率6%以上を達成する。有機強相	

				薄膜作製技術の開発を行うと共に積層化技術の開発を行う。高効率積層型素子の構築に取り組む。	関材料を用いた積層型ショットキー素子を作製し、多重励起生成効果にもとづくキャリア増倍率300%以上を達成する。 【26年度最終目標】 有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。
16	23 ～ 24	強相関材料 ボトムセル の開発B	理化学研 究所	光励起によって電荷整列状態が融解する際の電荷とスピンの時間緩和のメカニズムを明らかにする。多重生成されたキャリアを外部に有効に取り出すデバイス設計に資するシミュレーション技術を構築する。微細加工技術や自己組織化を利用して電荷整列絶縁体をナノ構造化し、光キャリアを電流として外部に取り出す効率を更に高める。	【24年度中間目標】 エネルギーが1eV以下の照射射に対し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として6%以上を達成する。薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長照射下での量子効率の増幅率として3倍以上を達成する。 【26年度最終目標】 強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術としてp、n層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧0.5V以上を達成する。
②-3 トップセルの開発					
17	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発A	産業技術 総合研 究所	平面ポリシラン系材料の合成技術を開発し合成した種々の平面ポリシラン系材料を用いて、平面ポリシラン系薄膜のバンドギャップを制御できる作製技術を開発する。ナノSi、構造制御ナノ材料等を用いたナノマテリアル増感型太陽電池の作製とデバイス特性の検証を行い、電極材料や構造、レドックス電解液等の最適化、ならびにキャリア移動メカニズムの評価、解析を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合太陽電池で変換効率12%を達成する。
18	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発B	東京農工 大学	ナノシリコン自立膜の面積化、バンドギャッププロファイルの最適制御、界面トラップ低減によりトップセルの特性を向上させる。また、ナノシリコンに特有の光電子機能を究明し、光電変換への利用を検討する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合ナノシリコン太陽電池で10%の変換効率を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合ナノシリコン太陽電池で12%の変換効率を達成する。
19	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発C	九州大学	ダブルマルチホロー放電法を用いてSiC、SiNなどを表面修飾剤としてナノドットを作製する。表面修飾層の膜厚、組成比、ナノドットのサイズ・サイズ分散、バンドギャップなど重要パラメータとプラ	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率10%を達成する。

				ズマパラメータの相関を明らかにするとともに、量子ドット増感太陽電池を試作して、ナノドットの重要パラメータと多重励起子生成の相関を明らかにする。	【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率12%を達成する。	
20	23 ～ 24	化合物系トップセルの開発A	産業技術総合研究所	カルコゲナイド光吸収層の制御技術を確立し、またトップセルに適したバッファ層を検討することで、トップセルの高性能化を図る。InGaP/InGaAs系量子ドット構造の作製技術の開発を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の太陽電池で変換効率10%を達成する。InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率10%を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eVの太陽電池で変換効率12%を達成する。InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率12%を達成する。	
21	23 ～ 24	化合物系トップセルの開発B	パナソニック(株)	複数の液体ソースを用いてバンドギャップの異なる層を多段階に形成する製膜技術を開発し、液体ソースの組成制御と膜厚の精密制御によるバンドギャップ分布の最適化を行う。窓層-光吸収層の界面制御、裏面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命10ns以上、内部量子効率90%以上、バンドギャップ以下の波長の全線透過率80%以上を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。	
22	23 ～ 24	化合物系トップセルの開発C	東京工業大学	酸化物半導体の探索とその欠陥密度の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。	【24年度中間目標】 ワイドギャップ酸化物半導体(バンドギャップ1.7eV以上)を用いた太陽電池で、変換効率10%を達成する。 【26年度最終目標】 ワイドギャップ酸化物半導体(バンドギャップ1.7eV以上)を用いた太陽電池で、変換効率12%を達成する。	
23	23 ～ 24	化合物系トップセルの開発D	豊橋技術科学大学	Cu-0系ならびにCu-Ag-0系光吸収層用高品質酸化物材料の電気化学的形成技術、Cu/0ならびにCu/Ag比制御によるバンドギャップ制御技術などの要素技術を開発すると共に、多接合型太陽電池トップセルに好適なバンドギャップ1.7eV以上のCu-0単接合太陽電池を形成し、ワイドバンドギャップ酸化物材料、バンドギャップ制御技術ならびに高品質化技術の実証を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率10%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ1.7eV以上のCu-0において $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成し、Cu-0/Zn0単接合太陽電池形成技術を確立する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ1.7eV以上	

					のCu-0単一配向膜にて移動 度 $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成する。	
--	--	--	--	--	-------------------------------------------------------------------	--

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

本テーマでは、大面積化が可能な薄膜系で、将来、エネルギー変換効率 40%を実現するため、ワイドギャップからナローギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネジメント技術開発を行う。これらの要素技術をもとに、5-6 接合からなる低倍率集光型薄膜太陽電池を試作し、エネルギー変換効率 30%を達成する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

平成 22 年度中間目標

バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネジメント・TCO 等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 20%（有効受光面積： 1cm^2 ）を達成する。

平成 24 年度中間目標

薄膜フルスペクトル太陽電池の光吸収層、ならびに周辺技術等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 25%（有効受光面積： 1cm^2 ）を達成する。

平成 26 年度最終目標

小面積の 5-6 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30%（低倍率集光、有効受光面積： 1cm^2 ）を達成する。

表 8. 研究開発項目別開発内容、目標③（平成 20～22 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
③-1バンドエンジニアリング						
1	20～22	ナノドット禁制帯幅制御	東京工業大学	薄膜フルスペクトル太陽電池のミドルセル用光吸収層材料として、1.1-1.6eVの範囲で禁制帯幅制御が可能なSiC/Siナノドットを開発する。	<p>【22年度中間目標】 SiC/Siナノドットの欠陥密度を$1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$以下にまで低減する技術を開発することにより、単接合セルで真性変換効率5%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 Siナノドット単接合セルで真性変換効率10%を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する（ナノドットセルからの真性変換効率3%）。</p>	
2	20～22	マルチエキシトン	東京工業大学	シリコン量子ドットのバンドエンジニアリング、並びに、状態密度制御によるフォノン散乱抑制、マルチエキシトン生成による変換効率向上などの諸効果の原理実証と、薄膜太陽電池へ適用可能性を検証するため、薄膜シリコン系技術と整合性があり、かつ、高品質なシリコン量子構造形成可能なSi/CaF ₂ ヘテロエピタキシャル量子ドット構造を用いて、原理検証のための研究を行う。	<p>【22年度中間目標】 Si量子ドットの遷移エネルギー$E_g < E < 3.3\text{eV} (@1\text{nm})$領域における、マルチエキシトン生成(2Eg)等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能なSi量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。</p> <p>【26年度最終目標】 pinセル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。</p>	
3	20～22	ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術	三洋電機(株)	高品位マトリクス形成技術の開発を行い、ナノドット粒子配置法の開発、及び量子効果の検証を行う。さらにナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜で、バンドギャップ制御幅約0.2eV、欠陥準位密度$5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$以下。</p> <p>【26年度最終目標】 単接合セルで変換効率7%。</p>	
4	20～22	Geの遷移型制御	東京工業大学	遷移型制御の理論予測及び最適構造設計と歪Ge膜の結晶成長技術の開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 歪Ge膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー0.7eV付近における光吸収係数の1桁以上の増大を確認する。</p> <p>【26年度最終目標】 直接遷移型へと転換した歪Geを用いた単接合太陽電池において、真性変換効率5%を達成する。</p>	
5	20	薄膜新材料	岐阜大学	アモルファス/微結晶化合物	【22年度中間目標】	

	～ 22		(再委託： 岐阜工業高等専門学校)	薄膜新素材の開発と組成比等による禁制帯幅制御技術を確認する。さらに、ゲストフリーSiGe系クラスレート薄膜の開発を行う。金属およびシリコンの蒸着による金属Si混合薄膜の作製技術を開発し、金属Si混合薄膜から金属内包Siクラスレート薄膜を作製する。さらに、この薄膜の熱処理により、ゲストフリーSiクラスレート薄膜を作製する。	禁制帯幅2.2eV程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発し、それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧1.0V以上を達成する。光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のゲストフリー/希ガス内包Siクラスレート薄膜を作製する。 【26年度最終目標】 単接合太陽電池にて開放電圧1.2V以上を達成する。ゲストフリー/希ガス内包 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ クラスレート薄膜において、理論値1.3-2eVをもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅1.8eV程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率5%を達成する。	
6	20 ～ 22	ワイド/ナローギャップ材料設計	龍谷大学	ワイドバンドギャップ光吸収層材料として $E_g=1.7-2.0\text{eV}$ 、ナローバンドギャップ光吸収層として $E_g=0.6-1.0\text{eV}$ の直接遷移型化合物半導体の組成、結晶構造、結晶配向を設計する。材料設計で得られた特性を実験結果と比較して材料設計の有効性を確認する。この成果を、中心機関と連携して太陽電池に適用する。	【22年度中間目標】 中心機関と連携して太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率20% (有効受光面積 1cm^2) を得る。 【26年度最終目標】 5-6接合からなる低倍率集光型化合物系薄膜太陽電池材料 ($0.6-2.0\text{eV}$) の材料設計を行い、中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。	
③-2薄膜フルスペクトル太陽電池						
7	20 ～ 22	シリコン系薄膜集光型セル	東京工業大学 (再委託： 奈良先端科学技術大学院大学)	シリコン系薄膜、CdTe薄膜、カルコバイライト薄膜、ならびに、これらを組み合わせた薄膜フルスペクトル太陽電池を開発する。さらに、これらの薄膜フルスペクトル太陽電池を低倍率集光下で有効に動作させるためのデバイス技術を開発する。	【22年度中間目標】 低倍率集光で真性変換効率20% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。 【26年度最終目標】 低倍率集光多接合セルで真性変換効率30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。	
8	20 ～ 22	広バンドギャップシリコン系薄膜	シャープ(株)	短波長の光子エネルギーを有効に電力変換するためにエネルギーバンドギャップの大きなシリコン系合金薄膜材料を活性層に用いた薄膜太陽電池により高い電圧で電流を取り出せるようにして、これを光入射セルに適用した積層型マルチバンドギャップ多接合太陽電池に適用して変換効率の向上を図る。	【22年度中間目標】 単接合型薄膜太陽電池で開放電圧1.2V以上 (サイズ 1cm^2 以上)。多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率15%以上。 【26年度最終目標】 多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率17%以上 (サイズ 1cm^2 以上)	

9	20 ～ 22	サブセル界面接合技術	三菱電機(株)	超高効率の薄膜フルスペクトル太陽電池を実現するために、低倍率集光時(～50suns)に問題となるフィルファクタの低下を防止するサブセル界面接合技術を開発する。	<p>【22年度中間目標】 サブセル界面におけるトンネル伝導評価の基本技術およびサブセル界面に電氣的に作用する薄膜構造体の開発により、サブセル界面抵抗$300 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ (サブセル界面部電圧降下0.15V以下)を得ることを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 トンネル伝導評価手法の高精度化およびサブセル界面のトンネル伝導促進技術の完了により、サブセル界面抵抗$100 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ (サブセル界面部電圧降下0.05V以下)を得ることを目標とする。</p>
10	20 ～ 22	カルコパイライト系集光型セル	東京工業大学	Ag系ワイドバンドギャップ材料の開発を行う。1.1eV集光セルの開発、1.4eV帯カルコパイライト系材料の高品質化、カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術の開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 最終目標を達成する為のAg系及びCu系カルコパイライト材料を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。バンドギャップ1.1eVのCu(InGa)Se₂薄膜太陽電池を用いて、低倍率集光時真性変換効率20% (単接合、有効受光面積1cm^2)を得る。Ag(InGa)Se₂薄膜太陽電池において開放電圧0.9V以上を得る。対向する透明導電膜付きガラス基板上にCu(InGa)Se₂薄膜太陽電池を貼り合わせ、変換効率15%を達成する。貼り合わせによる2層タンデム構造の課題を抽出する。</p> <p>【26年度最終目標】 メカニカルスタック型2-3層タンデム太陽電池において、低倍率集光時真性変換効率25% (有効受光面積1cm^2)を得る。</p>
11	20 ～ 22	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	青山学院大学	CuInTe系薄膜形成と太陽電池の試作を行う。放熱基板上でのCIGS太陽電池の作製を行う。さらに集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討を行う。	<p>【22年度中間目標】 放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率10% (ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積0.5cm^2程度) および20% (ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積0.5cm^2程度)を達成する。中心機関と連携して最終目標を達成する為に放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。</p> <p>【26年度最終目標】 放熱基板上のカルコパイラ</p>

					イト系集光セルで真性変換効率25% (単接合、低倍集光、有効受光面積 0.5cm^2) を実現する。	
12	20 ～ 22	構造設計とカルコパイライト系トップセル	立命館大学	高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行う。 高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップ $\text{Cu(In,Al)}\text{S}_2$ (CIAS) 太陽電池の開発を行う。	【22年度中間目標】 デバイス構成 (セル数・集光倍率) と各要素セルの仕様 (E_g , η , J_{sc} , V_{oc} , F , サブバンドギャップの透過率) を明示する。テーマ全体の最終目標達成の為のデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。 CIAS薄膜 ($E_g=1.9\text{--}2.3\text{eV}$) について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率5%を得る。 【26年度最終目標】 変換効率40%実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。 TCO上でのCIAS薄膜の成長技術開発を行い、CIAS単接合太陽電池で真性変換効率10.5%を得る。	
13	20 ～ 22	光学設計技術	(株)カネカ	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術として、太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離し、閉じ込めるオプティカルカップリング・オプティカルスプリッティングによる光マネジメント構造の設計方法を開発する。さらに、中心機関で作製されたシリコン系・化合物系の薄膜太陽電池を活用して薄膜フルスペクトル太陽電池を実現する。	【22年度中間目標】 変換効率30%を達成する為のオプティカルカップリング構造を提案する (シミュレーションによる光学設計)。 オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計により変換効率が3%向上することを実証する。 【26年度最終目標】 オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。	
14	20 ～ 22	集光型CdTe薄膜	木更津工業高等専門学校	集光型CdTe太陽電池を開発し、シリコン系薄膜太陽電池などと組み合わせて多接合セルあるいは波長スプリッティングによる集積型セルを開発する。	【22年度中間目標】 直列抵抗 $0.5\Omega\text{cm}^2$ を得る。シリコン系薄膜/CdTe 4端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時真性変換効率20% (有効受光面積 1cm^2) を得る。	

					<p>【26年度最終目標】 直列抵抗$0.2\Omega\text{cm}^2$を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率30%（有効受光面積1cm^2）を達成する。</p>
③-3光のマネジメント・TCO					
15	20 ～ 22	表面プラズモン	東京工業大学	半導体太陽電池に適用可能な金属ナノ粒子の表面プラズモンによる効果を明確化し、その効果を有効に利用できる太陽電池構造を検討することで、変換効率向上を目指す。また、得られた知見から表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法を提案する。	<p>【22年度中間目標】 半導体太陽電池における表面プラズモン効果を明確にする（ピーク波長における光電流の5%向上）。</p> <p>【26年度最終目標】 表面プラズモンによりピーク波長での光電流を10%向上し、表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法を提案する。</p>
16	20 ～ 22	p形透明導電膜	龍谷大学（共同実施：新潟大学）	集光型セル用p型透明導電膜への要求特性を満足する新材料の探索研究を行い、材料の薄膜作製技術開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 基本特性として$E_g > 3.0\text{eV}$、$\sigma > 10\text{S/cm}$を達成する。中心機関と連携して、p型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用してp型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換効率10%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 基本特性として$E_g > 3.0\text{eV}$、$\sigma > 10^3\text{S/cm}$を達成する。</p>
17	20 ～ 22	フルスペクトルTCO	旭硝子(株)	多接合薄膜フルスペクトルセルに適用可能な透明電極の開発を目的として、太陽光のフルスペクトルにわたって透明でかつ高い導電性を有する膜材料の開発と、フルスペクトルにわたって透過率を有する透明導電基板の開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 2,000nmまで透明なTCOとして可能性のある材料を探索し、概ね400-1,400nmで光吸収率が5%以内（浸液法で測定したTCO基板としての透過率で87%）、比抵抗$1 \times 10^{-2}\Omega\text{cm}$以下を実現する。</p> <p>【26年度最終目標】 選定された材料の成膜プロセスに改良を加え、フルスペクトルに対して有効な光散乱・光閉じ込め効果を有する表面テクスチャ形状を付与する手法を開発する。概ね400-2,000nmの波長で光吸収率が5%以内、ヘイズ率40%以上で比抵抗$1 \times 10^{-2}\Omega\text{cm}$以下を達成する。</p>
18	20 ～ 22	グラフェン透明導電膜	富士電機ホールディングス(株)	超高効率太陽電池で必須となる赤外領域においても透過率が高い透明導電膜の開発を目的として、新規材料であるグラフェンを透明導電膜へ適用するための技術開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 導電率$6 \times 10^3\text{S/cm}$以上、透過率80%以上（380-2,000nm）を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 シート抵抗$10\Omega/\square$以下、透過率90%以上（380-2,000nm）</p>

)を達成する。	
--	--	--	--	--	---------	--

表 9. 研究開発項目別開発内容、目標③ (平成 23～24 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
③-1 トップセル						
1	23～24	シリコン系薄膜集光型セル	東京工業大学 (再委託：木更津工業高等学校)	シリコン系薄膜、カルコパイライト系等薄膜、ならびに、これらを組み合わせた5接合等の薄膜フルスペクトル太陽電池を開発する。さらに、これらの薄膜フルスペクトル太陽電池を低倍率集光下で有効に動作させるためのデバイス技術、ならびに薄膜フルスペクトル太陽電池の特性評価技術を開発する。	<p>【24年度中間目標】 低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率20%を達成する。また5接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率25% (開放電圧3.72V、短絡電流9.0mA/cm²、曲線因子0.75、10倍程度の集光時) を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率22%を達成する。また5接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率30% (開放電圧4.0V、短絡電流9.6mA/cm²、曲線因子0.78、10倍程度の集光時) を達成する。</p>	
2	23～24	広バンドギャップシリコン系薄膜	シャープ(株)	短波長光の光子エネルギー損失を低減できる太陽電池の開発を目的として、広バンドギャップシリコン系薄膜太陽電池の材料開発と接合界面での電子構造制御技術開発を行う。	<p>【24年度中間目標】 開放電圧1.06V (集光時1.16V)、短絡電流密度9.0mA/cm² (有効受光面積1cm²) を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 開放電圧1.10V (集光時1.20V)、短絡電流密度9.6mA/cm² (有効受光面積1cm²) を達成する。</p>	
3	23～24	カルコパイライト系トップセル	立命館大学	カルコパイライト相変化分析用XRD加熱ステージを導入し、成長条件と異相生成の関係を明らかにすることで、異相を含まない高品質CIAS薄膜を実現する。CIAS薄膜中のAl濃度制御や新バッファ層等の高効率デバイス技術を駆使し、CIAS太陽電池を作製する。	<p>【24年度中間目標】 裏面電極がTCOであるスーパーストレート型CIAS太陽電池で、低倍率集光下で変換効率6%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 裏面電極がTCOであるスーパーストレート型CIAS太陽電池で、低倍率集光下で変換効率8%を達成する。</p>	
4	23～24	InGa _N 薄膜	岐阜大学	禁制帯幅2.0eV程度のトップセルに使用可能なInGa _N の製膜技術と高品質化技術の開発を行う。さらに2.0eV程度の禁制帯幅のInGa _N 薄膜太陽電池の開発を行う。	<p>【24年度中間目標】 1.10V (1sun)、1.20eV (10suns) の開放電圧を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 1.18V (1sun)、1.30eV (10suns) の開放電圧を達成する。</p>	
③-2 ミドルセル						
5	23～24	Si量子ドット禁制帯幅制御	東京工業大学	1.1-1.5eVの禁制帯幅の範囲で、高効率を示すSi系量子ドット太陽電池を開発する。具体的には、TiO ₂ :Nbを高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリエーション層として用いた禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太	<p>【24年度中間目標】 TiO₂:Nbを高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリエーション層として用いた禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太</p>	

				て用いたSi系量子ドット太陽電池の高品質化技術、フルスペクトル太陽電池としてのデバイス設計技術開発を行う。	陽電池で変換効率7%を達成する。 【26年度最終目標】 Si系量子ドット系太陽電池で変換効率10%を達成する。
6	23 ～ 24	ナノドット量子効果	パナソニック(株)	マトリクス相原料として非真空系プロセスの適用が可能な材料を用い、ナノドット材料との最適な組合せを可能にする要素技術の開発とその太陽電池への実証を行い、これにより単接合セルの開発を行う。	【24年度中間目標】 変換効率10%（低倍率集光時）を達成する。 【26年度最終目標】 変換効率11.4%（低倍率集光時）を達成する。
7	23 ～ 24	カルコパイライト系集光型セル	東京工業大学	直接貼り合わせ技術を用いた、カルコパイライト系タンデム型薄膜太陽電池を開発する。トップセル材料としては1.8eV帯のAg(InGa)Se ₂ 、ミドルセル材料としては1.4eV帯の高Ga組成Cu(InGa)Se ₂ （平均Ga組成70%）、ボトムセル材料としては1.1eV帯の低Ga組成Cu(InGa)Se ₂ （Ga組成30%）を開発する。	【24年度中間目標】 a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成する。 【26年度最終目標】 a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、さらに歪Ge太陽電池を含めたさらなる多接合化により、低倍率集光多接合セルで変換効率30%を達成する。
③-3ボトムセル					
8	23 ～ 24	歪Ge	東京工業大学	歪Ge膜の成長時に基板からGaおよびAs拡散が生じ、歪Ge膜が低抵抗化する問題に対し、表面窒化拡散バリア層形成などに取り組み、これら問題点を解決することでエピタキシャル歪Ge膜の高品質化に取り組む。更にダブルヘテロ接合型太陽電池を作製する。	【24年度中間目標】 1.1eV以下の低エネルギー光照射下において変換効率2%（低倍率集光）を達成する。 【26年度最終目標】 1.1eV以下の低エネルギー光照射下において変換効率3%（低倍率集光）を達成する。
9	23 ～ 24	非真空CuIn(Se, Te) ₂	龍谷大学	メカノケミカルプロセスにより合成したCuIn(Se, Te) ₂ 微粉末を原料に用いてスクリーン印刷/高圧焼結法でCuIn(Se, Te) ₂ 膜を作製する。	【24年度中間目標】 第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率2%（低倍率集光時） 【26年度最終目標】 第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率3%（低倍率集光時）
10	23 ～ 24	蒸着CuInTe ₂ 系セル	青山学院大学	ナローギャップ CuInTe ₂ 系薄膜の高品質製膜技術を開発する。製膜法としては、MBE装置を用いた多源蒸着法、およびTe化法を用いる。また、生成膜の結晶学的、光学的、電気的諸特性を調べ、光吸収	【24年度中間目標】 CuInTe ₂ 系ボトムセルで変換効率2%（低倍率集光）を実現する。 【26年度最終目標】 CuInTe ₂ 系ボトムセルで変換

				層としての最適製膜条件を確立する。また、不純物添加によるキャリア濃度制御技術の開発を行う。	効率3%（低倍率集光）を達成する。	
③-4透明導電膜						
11	23 ～ 24	p型透明導電膜	龍谷大学（共同実施：新潟大学）	各種p型透明導電膜の光学および電気特性の向上に取り組む。そのために、薄膜作製プロセスの検討を行うとともに、第一原理計算による材料設計技術も応用する。さらに、新たにp型透明導電膜形成装置を導入して、Si系や化合物薄膜系太陽電池に応用するための薄膜を積極的に作製し、得られたp型透明導電膜を太陽電池に応用した際の問題点を明らかにする。	<p>【24年度中間目標】 基本特性として$E_g > 3.0\text{eV}$、$\sigma > 300\text{S/cm}$を達成する。従来のSnO_2やZnOよりも開放電圧を50mV以上増加する。</p> <p>【26年度最終目標】 基本特性として$E_g > 3.0\text{eV}$、$\sigma > 10^3\text{S/cm}$を達成する。</p>	
12	23 ～ 24	フルスペクトルTCO	旭硝子(株)	別元素添加による結晶誘電率制御を試みる。成膜条件、元素種類を検討し、結晶誘電率制御の効果を検証する。また成膜条件の調整により、結晶粒径を増大化し、移動度を向上する。また、光閉じ込め機能を追加するため、ガラス基板エッチング、TCOエッチングの検討を行う。	<p>【24年度中間目標】 400-2,000nmの波長での平均光吸収率が7%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、比抵抗$1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$以下を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 400-2,000nmの波長での平均光吸収率が5%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、比抵抗$1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$以下を達成する。</p>	
13	23 ～ 24	グラフェン透明導電膜	富士電機(株)	グラフェンの高品質化を目的にMBEによるグラフェンの製膜技術の開発を行う。主に成長のパラメータの抽出・最適化、表面制御を行う。MBEの技術を元に太陽電池への適応を想定した大面積化、低コスト化可能な製膜技術の原理検討を行う。	<p>【24年度中間目標】 シート抵抗$30 \Omega/\square$以下、透過率90%以上（380-2,000nm）を達成する。また、ITOなどのn型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧を50 mV以上増加させる。</p> <p>【26年度最終目標】 シート抵抗$10 \Omega/\square$以下、透過率90%以上（380-2,000nm）を達成する。</p>	
③-5界面接合						
14	23 ～ 24	サブセル界面接合技術	三菱電機(株)	p型およびn型透明導電膜材料・製膜プロセスの高度化を行う。接合抵抗-電流密度の関係から伝導メカニズムを明確化し、接合抵抗が電流密度に依存しないオーミック接合を形成することを指標として要素技術の高度化を行う。サブセル界面構造を多接合セルに挿入し、セル特性の曲線因子に与える効果を検証する手法の開発も行う。	<p>【24年度中間目標】 サブセル界面抵抗として$200 \text{m}\Omega \text{cm}^2$（測定電流密度$0.5\text{A}/\text{cm}^2$）を得る。</p> <p>【26年度最終目標】 サブセル界面抵抗として$100 \text{m}\Omega \text{cm}^2$（測定電流密度$0.5\text{A}/\text{cm}^2$）を得る。</p>	
③-6光学設計技術						

15	23 ～ 24	光学設計技術	(株)カネカ	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術として、太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離し、閉じ込めるオプティカルカップリング・オプティカルスプリットングによる光マネジメント構造の設計手法を開発する。化合物半導体太陽電池と薄膜シリコン太陽電池で直列・並列接続を組み合わせ形成する直並列多接合薄膜太陽電池を形成する技術開発を実施する。	<p>【24年度中間目標】 オプティカルカップリング構造の効果を確認する。光学的損失8%以下を達成する。カット波長を800-1,000nmの範囲で任意に変更できることを確認する。直並列3接合素子構造と通常の直列3接合とを比較し変換効率向上を確認する。</p> <p>【26年度最終目標】 光学的損失5%以下を達成する。直並列4接合素子で変換効率30%以上の達成する。</p>
③-7裏面反射					
16	23 ～ 24	表面プラズモン	東京工業大学	特定の波長に対して反射・透過する、SiO ₂ をマトリックスとする金属ナノ粒子膜を作製する。	<p>【24年度中間目標】 a-SiO/a-Si/μc-Siトリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、μc-Siボトムセルからの光電流を2mA/cm²以上向上させ、トリプル接合セルの短絡電流密度9mA/cm²以上を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 a-SiO/a-Si/μc-Siトリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、トリプル接合セルの短絡電流密度9.6mA/cm²以上を達成する。</p>

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

本テーマでは、集光型多接合太陽電池、薄膜多接合太陽電池の高精度な評価技術を米国の研究機関と共同で開発し、それに基づき各国間で国際的に整合性のある測定技術の確立・標準化を目指す。多接合太陽電池の屋内試験技術に強い日本と、晴天率・直達光比率が高い地域を多く持つ米国での蓄積を組みあわせ、共同で革新的太陽電池の評価試験技術を確立し、もって革新的太陽電池の研究開発の加速に資する。

本テーマの全体目標としては、以下とする。

平成22年度最終目標

集光型多接合太陽電池について、集光型太陽電池の屋内における高精度評価技術の開発を完了すると共に、日本と米国内での屋内外性能測定との比較検証を行う。

薄膜多接合太陽電池について、従来開発した単接合および従来型2接合太陽電池の評価技術をベースに、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の開発を完了する。

表 10. 研究開発項目別開発内容、目標④（平成 21～22 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
1	21 ～ 22	集光型多接合太陽電池評価技術	産業技術総合研究所	セル単体の高強度光源による評価、および集光光学系+セルからなる集光太陽電池ユニットの高平行度光源による評価の両方を日米で実施、比較し、セル性能・集光系性能両方の測定精度を検証する。日米における太陽電池からの出力および直達光拡散光・分光放射照度スペクトル等をはじめとする気象条件を測定する。	【22年度最終目標】 3接合以上の多接合で集光倍率500倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術及び屋外での出力に与える影響を定量的に比較、予測および解析する技術の完成	
2	21 ～ 22	薄膜多接合太陽電池評価技術	産業技術総合研究所	革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発する。革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証する。	【22年度最終目標】 Si系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の完成	

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

本テーマでは、高効率集光型太陽光発電デバイスの新構造と製造プロセスに関する研究開発、並びに、それらのデバイスに適した新たな特性評価技術の開発を、重点開発項目とし、更に、高効率集光型太陽電池セル、モジュール用新材料の開発も行う。

本テーマの全体目標としては、以下とする。

平成 24 年度中間目標

セル変換効率 42%以上、モジュール変換効率 33%以上を達成し、集光型太陽電池の高精度測定の課題を明確にする。

平成 26 年度最終目標

セル変換効率 45%以上、モジュール変換効率 35%以上を達成し、集光型太陽電池の標準測定技術（測定再現性±0.5%以内）を確立する。

表 11. 研究開発項目別開発内容、目標⑤ (平成 23～24 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
1	23～24	新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学、旭化成(株))	Ⅲ-V-N系薄膜のX線による三次元逆格子マップを測定し、N組成増加による転位挙動、転位伝播速度、伝播方向等を立体的に解析する。光学特性を、レーザー変調光反射 (PR) 法、圧電素子光熱変換分光 (PPT) 法やクライオスタットによる一軸圧力下でのフォトルミネッセンス (PL) 測定、および時間分解PL測定等により検討し、Ⅲ-V-N系薄膜のバンド端構造及びN原子起因の欠陥準位に関する知見を得る。	【24年度中間目標】 Ⅲ-V-N系新材料、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造の評価解析技術を確立する。 【26年度最終目標】 Ⅲ-V-N系新材料、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造太陽電池でセル変換効率30%以上を達成する。	
2	23～24	集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	東京大学 (再委託：神戸大学、タカノ(株))	集光型3接合タンデムセルの実現に向けて、Geボトムセルと格子整合し、1.1-1.2eV帯のエネルギー領域をカバーする量子・ナノ材料、構造の開発を行う。量子・ナノ構造における光励起キャリアダイナミックスの評価解析技術を開発する。	【24年度中間目標】 量子・ナノ材料、構造におけるキャリア励起・緩和ダイナミックス、キャリア寿命等の評価解析技術、また量子・ナノ構造セル特性評価解析技術を確立する。 【26年度最終目標】 量子・ナノ構造セルにおいてセル変換効率30%以上を達成するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術を完成する。	
3	23～24	先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	シャープ(株)	①「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」において開発された集光型太陽電池セルとモジュールをカスタマイズすることにより、標準測定技術の確立に寄与する。また、項目1、2で開発する新材料、新構造を適用した高効率集光型太陽電池の開発を実施する。	【24年度中間目標】 セル変換効率42%以上を達成する。 【26年度最終目標】 セル変換効率45%以上を達成する。	
4	23～24	集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	産業技術総合研究所	集光型太陽電池セルの評価を日本およびEUにて実施、比較し、性能評価の測定精度を検証する。集光型太陽電池ミニモジュール (太陽電池セル+集光光学系) の高平行度ソーラーシミュレータによる屋内評価技術を開発する。	【24年度中間目標】 各種集光型太陽電池の200倍から1,000倍程度の集光時に於ける性能評価において、測定精度の検証と高精度化のための課題を明確にする。 【26年度最終目標】 多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が±0.5%以内の測定技術をEU側研究機関と共同で確立する。	
5	23～24	高効率集光型太陽電池モジュール	大同特殊鋼(株)	標準測定技術確立の為に、標準レシーバと標準ユニットを開発する。集光型太陽電池用	【24年度中間目標】 モジュール変換効率33%以上を達成し、既存集光型太陽	

		の開発と集光型太陽光発電システム実証		日射品質指標や屋外校正技術も開発する。実用面と性能面ともに優れる集光光学系の開発も行う。	光発電システムのデータ収集・解析を完了する。 【26年度最終目標】 モジュール変換効率35%以上を達成し、50kW集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析、発電量予測を完了する。	
--	--	--------------------	--	----------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

2.2 研究開発の実施体制

本事業を実施するための基本計画については、平成 19 年 12 月、平成 20 年 1 月に外部有識者による革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会ならびに平成 20 年 1 月に外部有識者による太陽光発電技術委員会においてその方向性を審議し、平成 20 年 3 月に策定された。また、平成 21 年 8 月に「革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）」を追加し改訂された。更に、平成 22 年 3 月に「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）」を追加し改訂された。

本事業は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは独立行政法人等（以下、「委託先」）が、NEDO と業務委託契約を締結し実施した。

実施した公募の状況は以下のとおりである。

【平成 20 年度】

公募期間：

平成 20 年 3 月 19 日から 4 月 21 日

審査項目・基準：

- 1) 提案内容が本公募要領に記載の「事業の概要」に示す目的・要件と合致していること。
- 2) 提案内容に新規性・革新性があり、技術的に優れていること。
- 3) 共同提案の場合、研究開発テーマ内の各研究機関の提案内容が相互補完的であること。
- 4) 提案された研究内容・研究計画は実現可能であること。（技術的可能性、計画、目標の妥当性等）
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有していること。
- 6) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果が期待できること。
- 7) 総合評価

採択審査委員会（敬称略）：

委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）
委員 工藤 一浩（千葉大学 教授）
委員 田中 一宣（科学技術振興機構 上席フェロー）
委員 渡辺 征夫（九州電気専門学校 校長）

件数：

応募 7 件、採択 3 件

【平成 21 年度】

公募期間：

平成 21 年 8 月 28 日から 9 月 28 日

審査項目・基準：

- 1) 提案内容が本公募要領に記載の「事業の概要」に示す目的・要件と合致しているか。
- 2) 提案内容に新規性・革新性があり、技術的に優れているか。
- 3) 共同提案の場合、研究開発テーマ内の各研究機関の提案内容が相互補完的であるか。
- 4) 提案された研究内容・研究計画は実現可能であるか。（技術的可能性、計画、目標の妥当性等）
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有しているか。（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究予定先等を含めた実施体制、優秀な研究者の参加等）
- 6) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果が期待できるか。
- 7) 総合評価

採択審査委員会（敬称略）：

委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）
委員 小長井 誠（東京工業大学 教授）
委員 山口 真史（豊田工業大学 教授）

委員 和田 隆博（龍谷大学 教授）

件数：

応募1件、採択1件

【平成22年度】

公募期間：

平成22年7月20日から11月25日

審査項目・基準：

1) 提案内容の妥当性について

- ・研究内容と目標設定は本事業の目的に対応して妥当かつ明確か
- ・提案内容は、新規性があり、技術的に優れているか
- ・研究計画内容は目標達成の観点から効率的かつ妥当か

2) 研究実施体制等の妥当性について

- ・目標達成をするための具体的な研究手順は適切であるか
- ・研究開発の管理体制や管理手順が適切であるか
- ・提案者は本研究開発を遂行するための高い能力を有し、関連分野での実績は十分であるか
- ・予算配分や研究者等の研究実施体制は適切であるか

3) 波及効果について

- ・本研究開発を行うことにより、ECのワークプログラムあるいはNEDOの基本計画に言及されている波及効果に貢献しているか
- ・プロジェクトの成果の普及や活用及び知的財産権の管理等の対策が適切であるか

4) 日EU共同実施の重要性について

- ・欧州と共同で実施することにより、両者にとってメリットのある研究内容であるか
- ・共同実施体制は妥当であるか（相互補完性、明確な役割分担とそのバランス等）

採択審査委員会（敬称略）：

委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）

委員 田中 一宣（科学技術振興機構 上席フェロー）

委員 桑野 幸徳（太陽光発電技術研究組合 理事長）

件数：

応募2件、採択1件

研究開発の実施体制を図1～8に示す。

図1. 実施体制①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
(平成 20～22 年度)

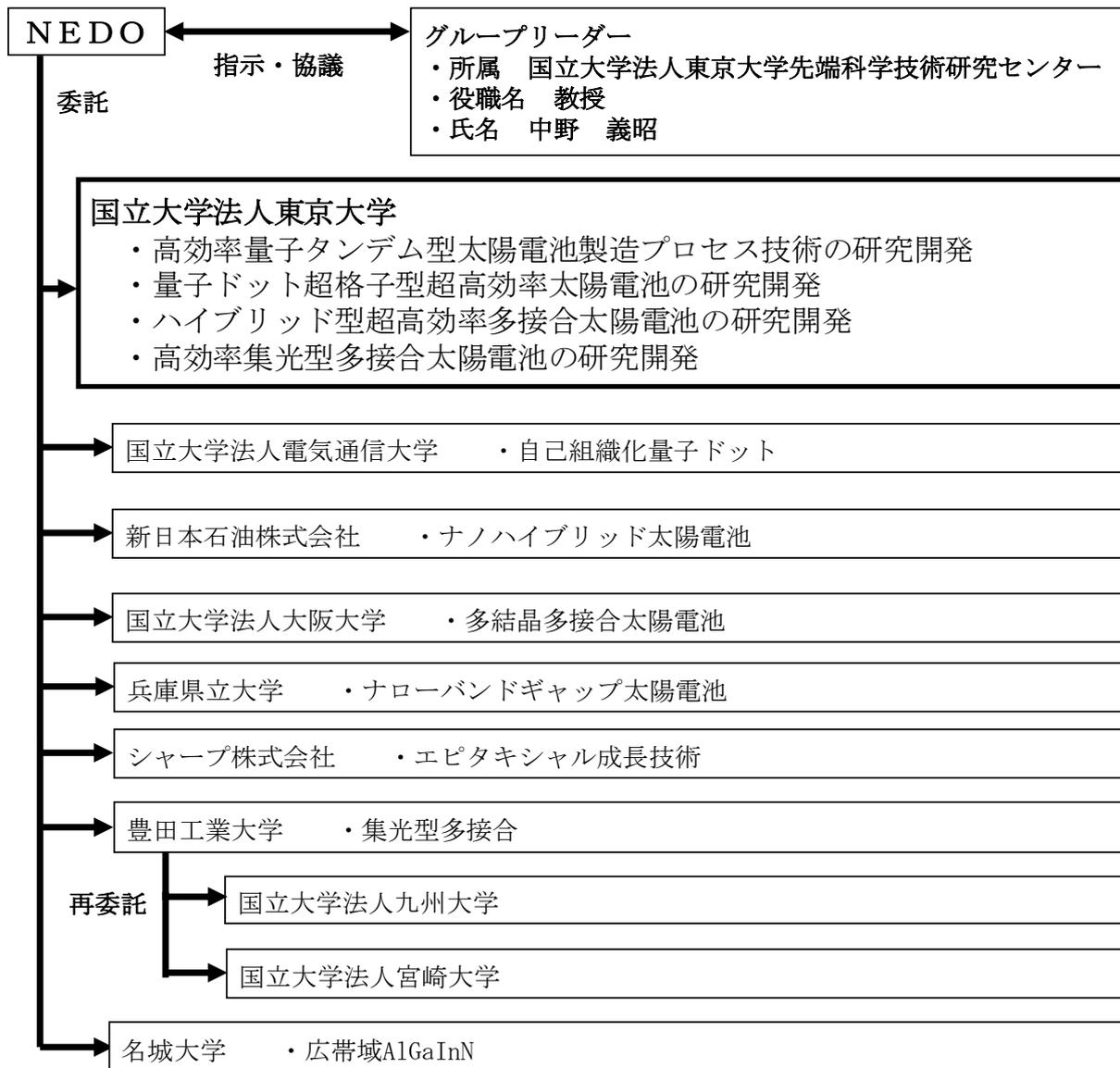


図2. 実施体制①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
(平成23～24年度)

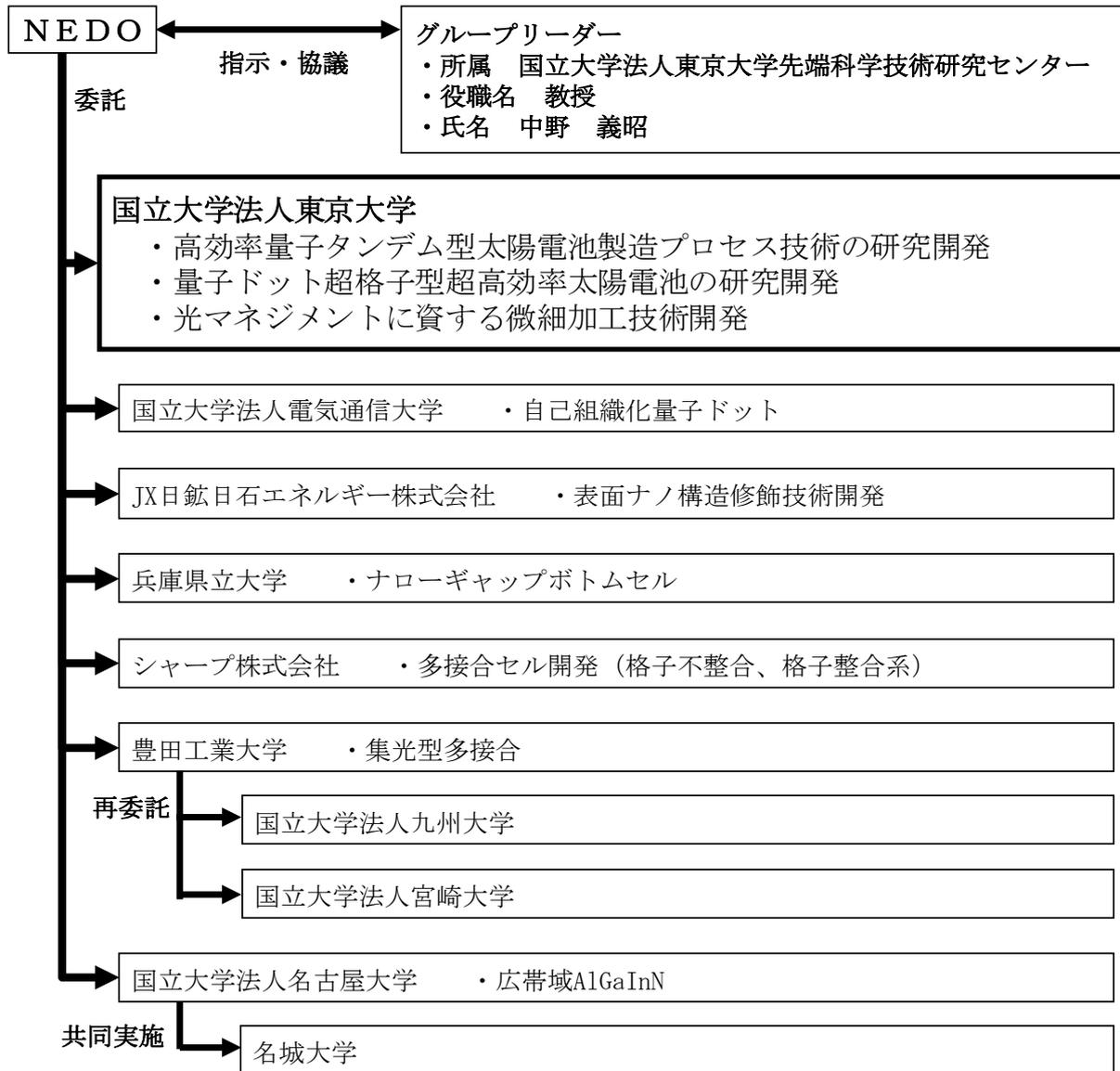


図 3. 実施体制②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
(平成 20～22 年度)

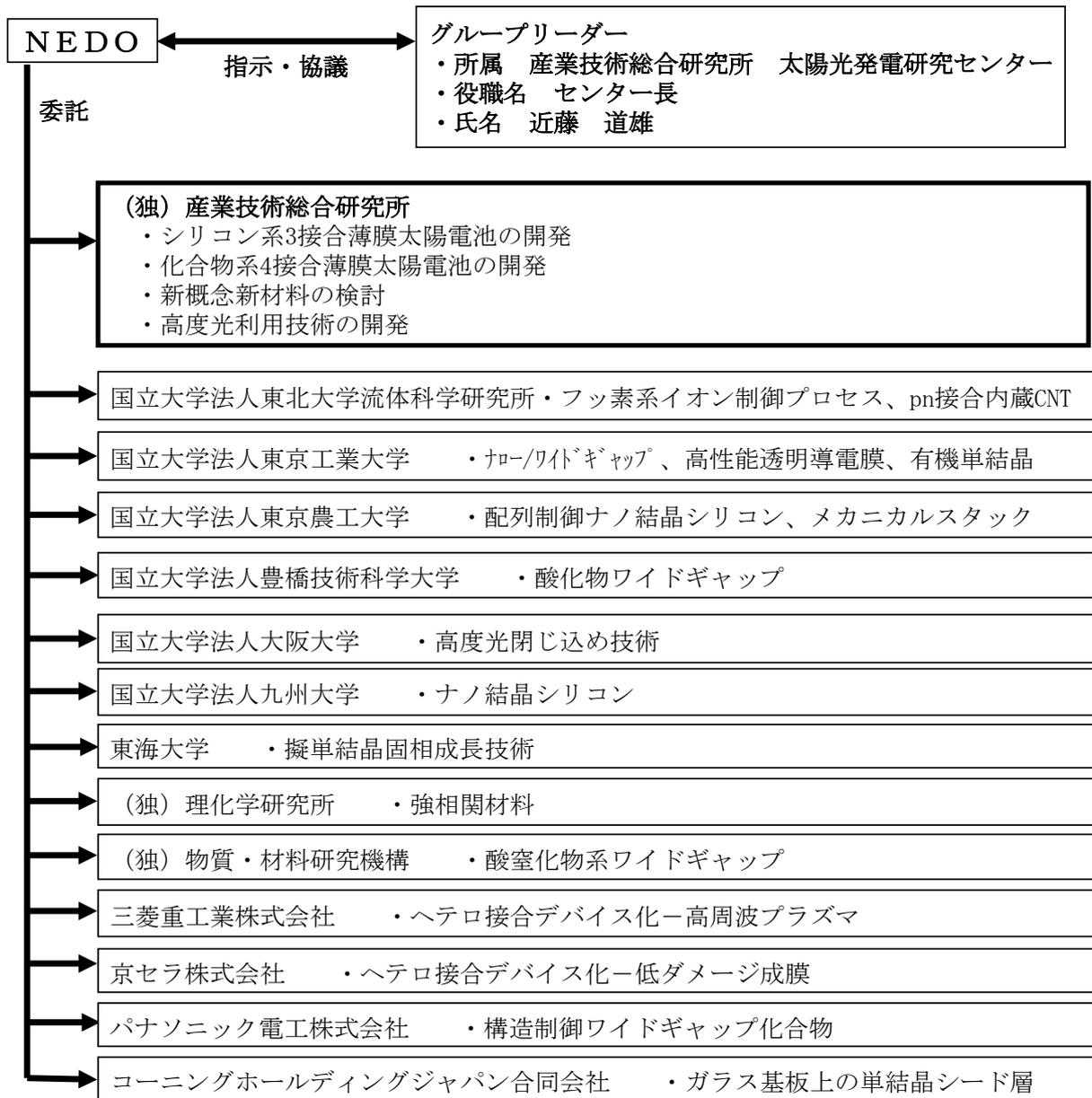


図 4. 実施体制②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
(平成 23～24 年度)

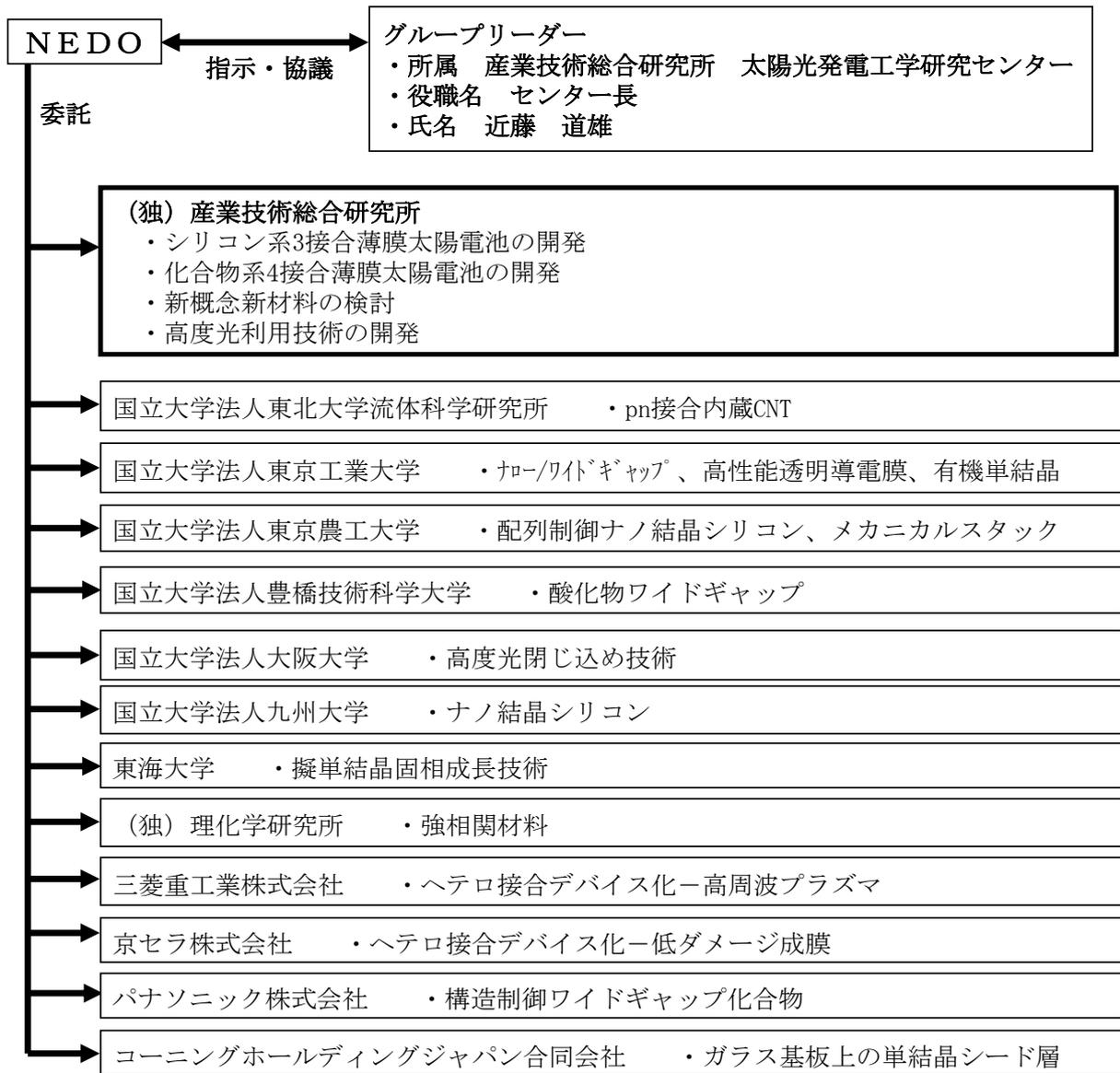


図 5. 実施体制③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
(平成 20～22 年度)

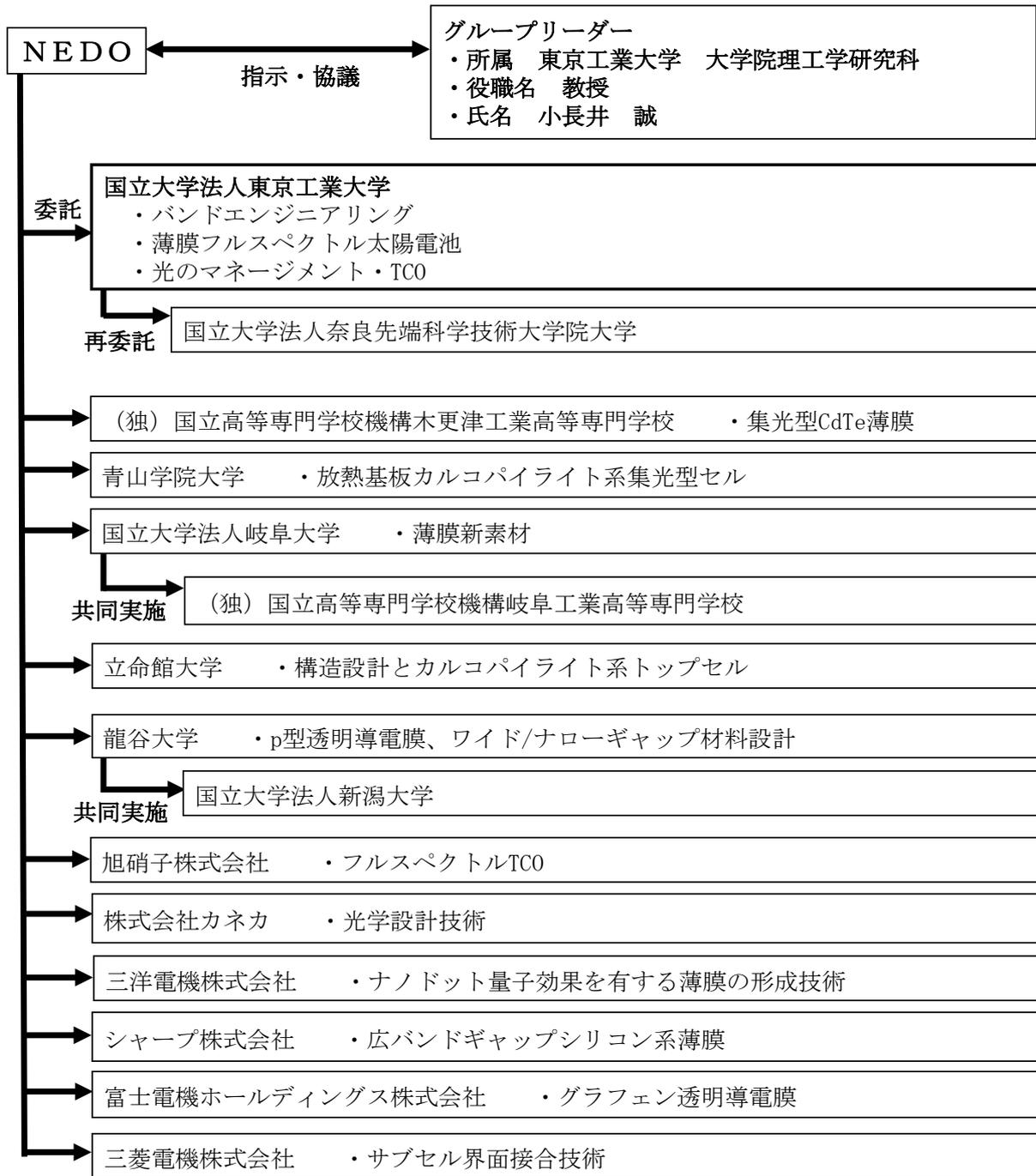


図 6. 実施体制③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
(平成 23～24 年度)

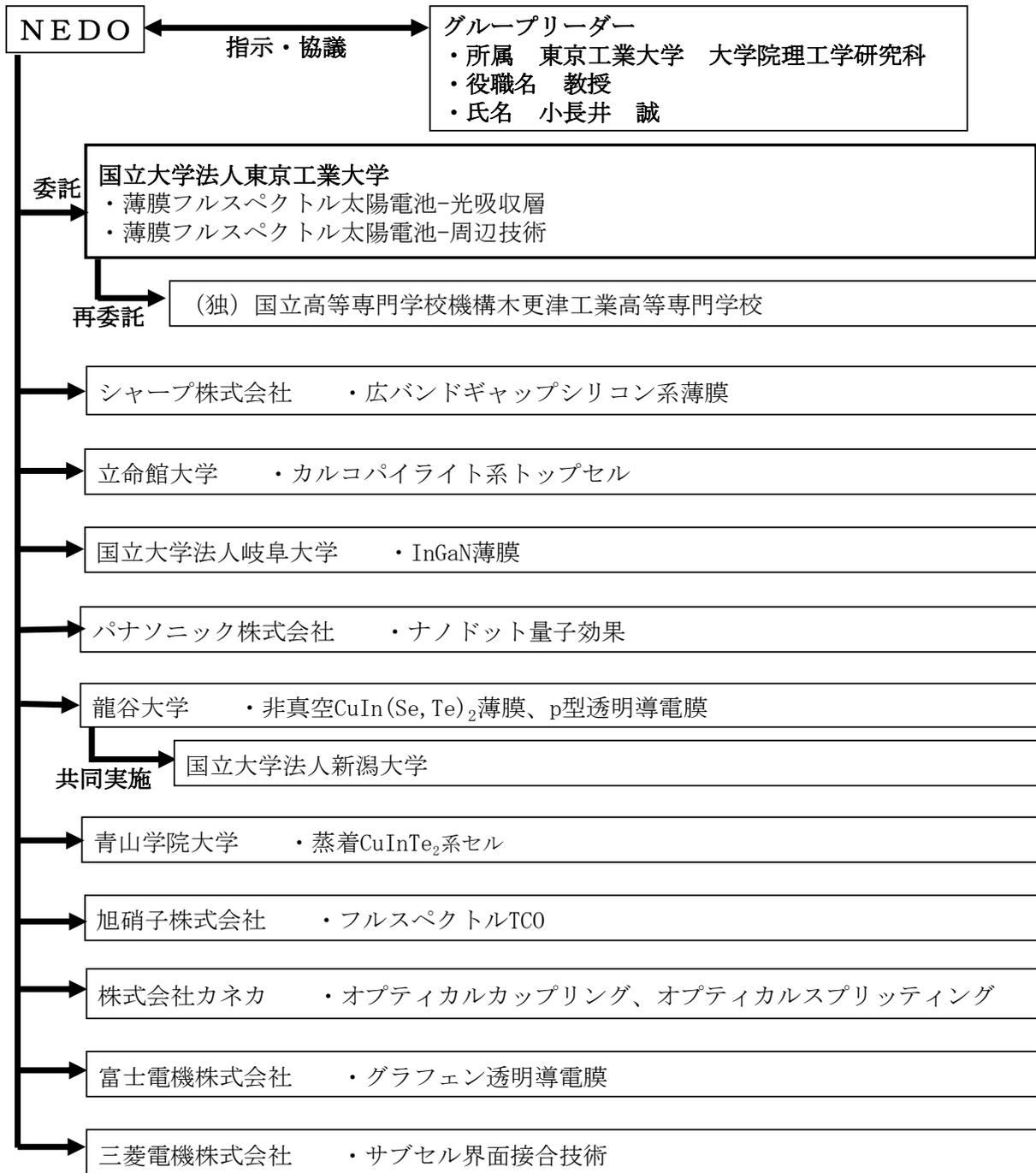


図 7. 実施体制④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）
（平成 21～22 年度）

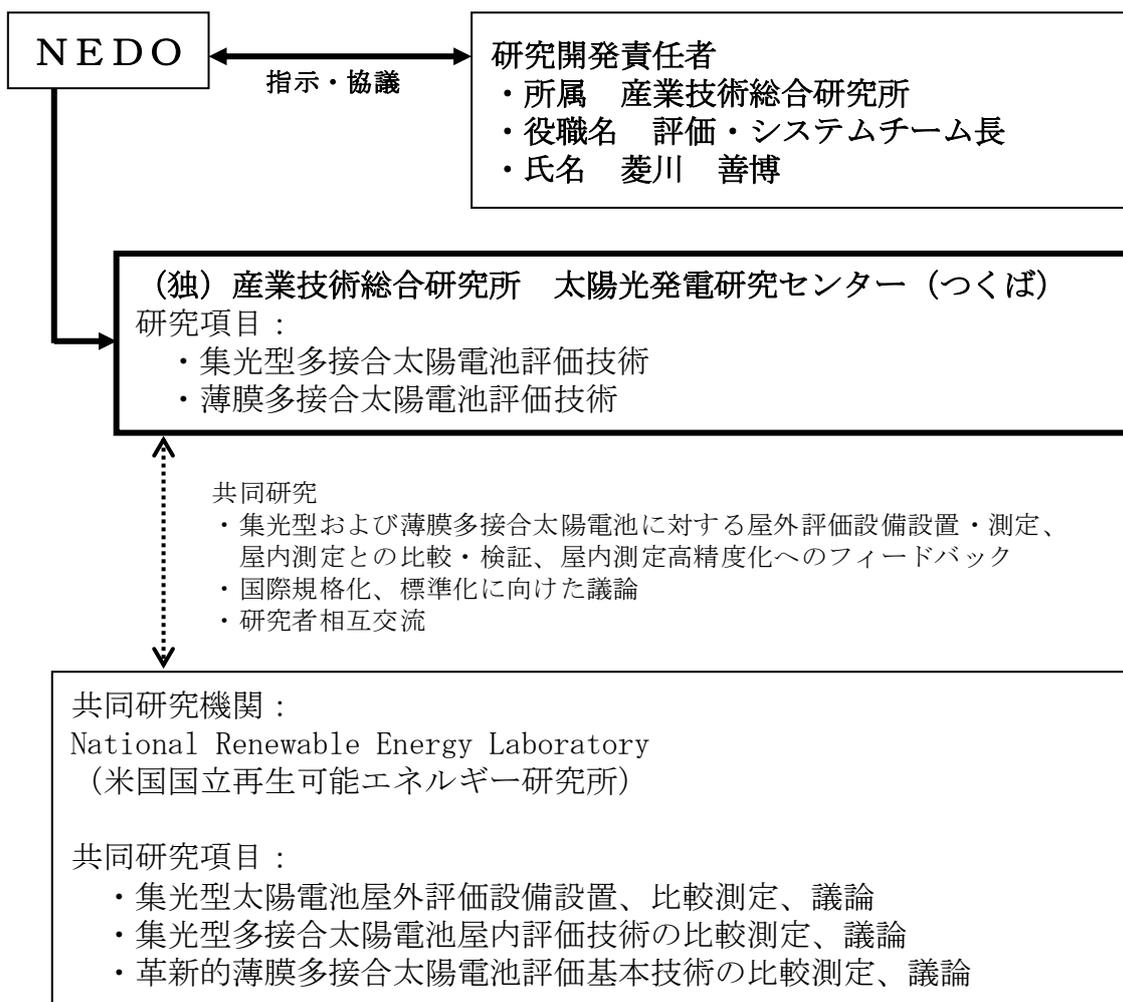
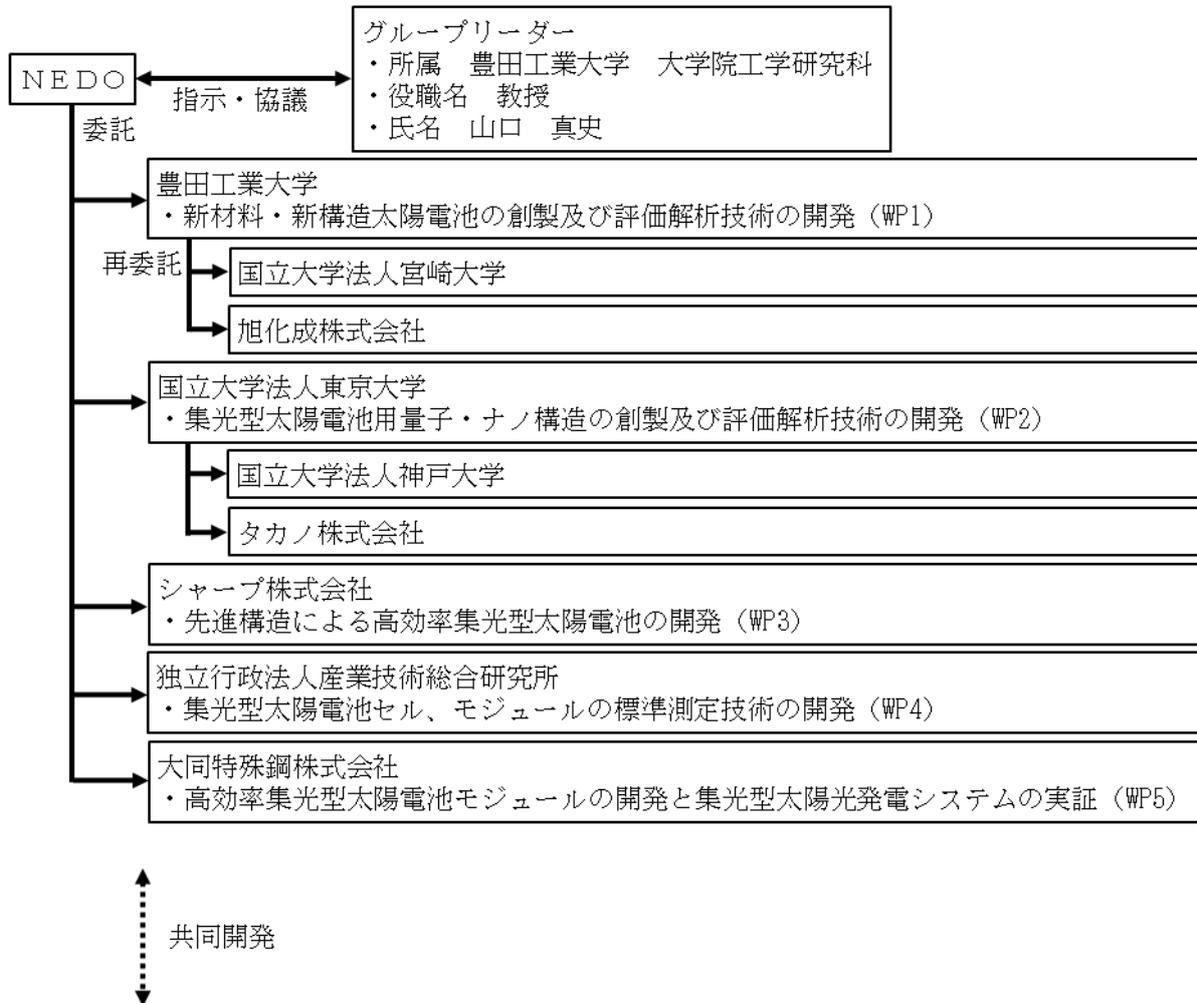


図 8. 実施体制⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発
 (日 EU 共同開発) (平成 23~24 年度)



【共同開発機関】
 UPM : Universidad Politécnica de Madrid
 FhG-ISE : Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
 ICSTM : Imperial College of Science Technology and Medicine
 ENEA : Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l' energia e lo sviluppo economico sostenibile
 BSQ : Compañia Española de Alta Eficiencia Fotovoltaica BSQ Solar, SL
 CEA-INES : Commissariat à l' Energie Atomique - Institut National de l' Energie Solaire

2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権をもつ NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また NEDO 新エネルギー部で実施する太陽光発電技術開発に関する全事業のあり方やロードマップの策定等について、外部有識者の意見を聴取するために太陽光発電技術委員会を開催し、運営管理に反映させた。

具体的に本プロジェクトに関しては、平成 19 年 12 月の「第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会」から、平成 20 年度以降の技術開発・研究開発の中で取り上げられ、それ以後、技術開発の進め方や公募の開発課題に関する意見を求め、公募要領に反映した。またプロジェクト実施期間中においては、その方向性や実施内容について意見を求め、研究開発の運営に反映した。（表 12 参照）

表 12. 太陽光発電技術委員会の実施状況

実施時期	実施項目	内容
平成 19 年 12 月	第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	「革新型太陽電池国際研究拠点整備事業」においてとりあげる技術分野、プロジェクトの構築方法など
平成 20 年 1 月	第 2 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	「革新的太陽光発電技術研究開発」の全体スキームおよび当面の実施の方向
平成 20 年 2 月	第 10 回太陽光発電技術委員会	平成 20 年度研究開発体制、「太陽光発電システム未来技術研究開発」中間評価結果、各プロジェクト基本計画（案）、実施方針（案）
平成 21 年 6 月	第 12 回太陽光発電技術委員会	平成 21 年度の実施方針と平成 22 年度以降の新規プロジェクト、PV2030+の公開など

また、5 グループにおいてそれぞれ GL（グループリーダー）主催による進捗報告会を年に数回開催した。進捗報告会においては、GL が進捗状況について委託先から報告を受け、開発の方向性などを審議し、必要に応じて開発内容を修正することとしている。（表 13 参照）

表 13. 進捗報告会の実施状況

実施項目	開催時期
東大グループ全体会議 （ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発）	平成 20 年 9、11 月、平成 21 年 2、4、6、8、10 月、平成 22 年 1、3、4、6、12 月、平成 23 年 2、4、5、10 月、平成 24 年 4、7 月
産総研グループ全体会議 （高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発）	平成 20 年 11 月、平成 21 年 8 月、平成 22 年 1、7 月、平成 23 年 2、9 月、平成 24 年 2 月
東工大グループ全体会議 （低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発）	平成 20 年 8、12 月、平成 21 年 7、10 月、平成 22 年 5、10 月、平成 23 年 3、7、11 月、平成 24 年 3、6 月
日米共同開発全体会議 （革新的太陽電池評価技術の研究開発）	平成 22 年 6、10、12 月、平成 23 年 2、3 月
日 EU 共同開発全体会議 （高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発）	平成 23 年 6、8、12 月、平成 24 年 3、4、7 月

さらに成果の発信・公表の場として、年度毎の成果報告会を、他の太陽電池関連事業と共に実施している。（表 14 参照）

表 14. 成果報告会等の実施状況

実施項目	開催時期	場所
平成 20 年度成果報告会	平成 21 年 7 月 17 日	はまぎんホールヴィアマール (横浜市みなとみらい)
平成 21 年度成果報告会	平成 22 年 7 月 27-28 日	東京国際フォーラム (東京都千代田)
平成 22 年度成果報告会	平成 23 年 11 月 8 日	はまぎんホールヴィアマール (横浜市みなとみらい)

加えて、成果の発信・公表ならびに情報交換の場として、本事業の 3 グループ（東大・産総研・東工大）合同開催で国際シンポジウムを実施している。（表 15 参照）本シンポジウムでは、さらなる研究加速の為に、欧米等から研究員を招聘して世界の最先端研究についての講演も行っている。

表 15. 革新的太陽光発電国際シンポジウムの実施状況

実施項目	開催時期	場所
第 1 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 3 月 2-3 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)
第 2 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 12 月 7-8 日	つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
第 3 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 22 年 10 月 7-8 日	東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)
第 4 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 24 年 3 月 5-6 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)
第 5 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	(予定)平成 25 年 1 月 21-22 日	つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

また他の太陽電池関連事業も含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿などを通じて成果の発信に努めている。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

研究開発成果の実用化に向けては、進捗報告会などを用いた迅速な進捗状況の把握を行い、進捗が著しいテーマについて、補正予算、加速流用予算等の予算手当てを行い、実証評価を行える段階に進めるようマネジメントしている。一例として、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」では、セル変換効率が目標通りに向上していることから、新たにモジュール開発も研究開発項目として設定し、実証評価を行うこととした。

また、本事業は基礎・基盤に位置づけられる超長期の事業であるが、常に出口候補企業の事業方針を確認し、実証評価を行うことと実用化がリンクするように調整をしている。

知的財産権についても、事業の進捗に併せ、出口候補企業と中心機関等が密接に連動するよう留意している。

3. 情勢変化への対応

【平成 20 年度】

予算総額 28.4 億円（当初示達額 18.7 億円、補正示達額 5.0 億円、加速流用額 4.7 億円）
次年度繰越額 2.0 億円

平成 20 年度の公募では、採択審査委員会で特に優良な評価を受けた以下 3 件を採択候補とした。

KPV20-001 提案者：国立大学法人東京工業大学

KPV20-003 提案者：独立行政法人産業技術総合研究所

KPV20-005 提案者：国立大学法人東京大学

しかしながら、KPV20-005 については太陽電池研究開発で実績のある研究者が、他採択候補と比較して不足していると考えられ、成果の創出に向けⅢ-V 族化合物系太陽電池の技術に実績のある研究者を

充当することが必要であると判断された。採択審査委員会では、この点を補う為に、別提案である KPV20-002（提案者：豊田工業大学）の一部を組み込んで実施することが下記の理由から有効との結論に至り、上記 3 提案（KPV20-001、KPV20-003、KPV20-005）のみを採択する場合には当初示達額の範囲内で実施出来る見込みではあったが、加速流用予算を手当てし、より体制を強化し研究開発を推進することとした。

豊田工業大学の山口真史教授等はⅢ-V族化合物系太陽電池の研究に関し 20 年以上の実績があり、特に結晶成長表面反応の制御等による欠陥密度の低減に研究実績がある。太陽電池とは直接的に関係してこなかった研究者が多い東京大学の研究に、豊田工業大学の知見を生かすことで新しい概念の太陽電池においても結晶中の欠陥密度の低減やキャリア濃度の制御が早期に達成され変換効率の向上に大きく貢献することが期待される。

また、補正予算として 5.0 億円を手当てし、平成 21 年度又は平成 22 年度に購入予定とした装置の一部を平成 20 年度に前倒し購入することで研究開発を加速した。

【平成 21 年度】

予算総額 27.8 億円（当初示達額 14.7 億円、補正示達額 9.0 億円、前年度繰越額 2.0 億円、
加速流用額 2.1 億円）
次年度繰越額 10.2 億円

平成 21 年度の公募では、革新的太陽電池の実用化に向け必要となるモジュール評価技術確立する為に、補正予算として 9.0 億円を手当てし、1 件を採択した。

「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」の内、研究開発の進捗により新たな課題が明確となった、研究開発項目「高倍集光セル微細加工技術」「量子ドット超格子型」を中心として加速流用予算を手当てし研究開発を加速した。

【平成 22 年度】

予算総額 28.3 億円（当初示達額 18.1 億円、前年度繰越額 10.2 億円）

平成 22 年度の公募では、集光型太陽電池の実用化に向け必要となるモジュール設計・評価技術確立する為に 1 件を採択した。なお、事業開始は平成 23 年度からとし予算手当てを行った。

『量子ドット』太陽電池等の開発を加速する為に、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」を中心に当初予算から 4.1 億円を手当てした。

【平成 23 年度】

予算総額 20.3 億円（当初示達額 20.3 億円）
次年度繰越額 0.4 億円

中間評価結果を踏まえ、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」のサブテーマ数を 73 から 55 に絞り込み事業を継続することとした。

【平成 24 年度】

予算総額 22.4 億円（当初示達額 22.0 億円、前年度繰越額 0.4 億円）

『3 接合化合物系』太陽電池の実用化を加速する為に、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）」に対し、当初予算から 2.5 億円を手当てした。

4. 中間評価結果への対応

【提言】

- 1) 本事業は変換効率 40%を実現する為の実用化研究が大きな目標の一つであるが、実用化に向けての道筋がやや不明確である点も見受けられる。本研究期間内の目標は変換効率のみに特化している為、量産性、低コスト化、資源問題の観点という本来の実用化に対する視点での戦略が明確でない。この点を明確にして、個別テーマの見極めによる選択と予算の集中が必要である。
- 2) 国際状況は急速に変化しており、国際競争力の状況、国際貢献の可能性等に対して、本事業で我が国の特色が明確に打ち出されたかどうかについてはやや不明瞭である。世界をリードするためには今後どの点を強化すべきかについての評価と検討が必要であろう。

【対応】

- 1) NEDO では「PV2030+」の方針に従い、2030 年の量産化開始に向けて基盤技術開発（シーズ探索等）、要素技術開発（セル化技術等）、実用化開発（量産化技術等）のフェーズを経て実用化につなげるシナリオを描いている。本事業は、基盤技術開発（シーズ探索等）のフェーズのものであるが、ご指摘を踏まえ、「太陽光発電システム普及委員会」等も活用して実用化に対する筋道をより明確にした上で、それを反映した戦略を策定して参りたい。そして、平成 23 年度以降の実施方針において、量産性、低コスト化、資源問題の観点も踏まえた上で、変換効率 40%超を見込めるテーマに選択と集中を図っていく。具体的には、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」のチーム体制を見直すとともに、個別のサブテーマを整理し、サブテーマ数を 73 から 55 に絞り込んだ。
- 2) 本事業では、材料技術等の日本が強みを有し独自に技術の高度化を図る分野については一層の強化を図る。一方、評価技術のように海外研究機関と協力する分野については必要性を見極めた上でさらに国際協力を進め我が国の技術力向上に繋げる。例えば、集光型太陽電池の評価について、本事業の一環として平成 23 年度より日 EU 共同にて標準化への取り組みを実施する。

5. 評価に関する事項

【事前評価】

評価実施時期：平成 19 年度

評価手法：外部評価

評価事務局：新エネルギー技術開発部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

委員長 小長井 誠（東京工業大学 教授）

委員 荒川 裕則（東京理科大学 教授）

委員 有本 智（三菱電機株式会社 中津川製作所 太陽光発電システム部 部長）

委員 大和田野 芳郎（産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 部門長）

委員 岡本 博明（大阪大学 教授）

委員 黒川 浩助（東京農工大学 教授）

委員 近藤 道雄（産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター長）

委員 佐賀 達男（シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 副本部長）

委員 高塚 汎（三菱重工業株式会社 長崎造船所太陽電池事業ユニット 技師長）

委員 田中 誠（三洋電機株式会社 ソーラーエナジー研究部 部長）

委員 太和田 善久（株式会社カネカ イノベーション企画部 部長）

委員 和田 隆博（龍谷大学 教授）

【中間評価】

評価実施時期：平成 22 年度

評価手法：外部評価

評価事務局：評価部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

分科会長	庭野	道夫（東北大学 電気通信研究所 副所長）
分科会長代理	堀越	佳治（早稲田大学 教授）
委員	一木	修（株式会社資源情報システム 代表取締役社長）
委員	工藤	一浩（千葉大学 教授）
委員	中嶋	一雄（京都大学 客員教授）
委員	野田	進（京都大学 教授）
委員	安武	潔（大阪大学 教授）

Ⅲ. 研究開発成果について

本事業の研究開発は、太陽光発電の経済性、性能・機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図り、太陽光発電の普及拡大を促進するため、現状技術の延長にない技術革新を目指した超長期的視野でテーマを募集し、その中から優れた提案を採択し実施した。目標設定が挑戦的で、高い目標を掲げたテーマが多いこともあり、成果達成への道のりがかなり厳しいテーマもある。その場合でも、いろいろな材料・構造・製造方法等のアプローチの中で、実施したアプローチが、所期の目標達成につながらなかった理由、目標達成への道筋が明確にできれば、後年度の研究開発へとつなげる。

現段階では、各要素技術の開発・検証を主に研究開発を行っているが、一部では、開発成果を集約した太陽電池の製作に至っている。研究開発の主要な成果を表 16～23 に示す。今後もこれらの成果を元に本事業の目標である「変換効率 40%超」かつ「発電コストが汎用電源未満料（7 円/kWh 未満）」の実現に向けさらに研究開発を行っていく。

1. 分野別、課題に対する主要な成果

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

主要な成果、達成度、今後の課題について表 16、17 に示す。

表 16. 主要な成果①（第 1 回中間評価時：平成 20～22 年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
エピタキシャル成長技術	<ul style="list-style-type: none"> ・逆積み3接合セルのバッファ層成長条件の最適化、電流整合により、非集光時変換効率33% ・トンネルピーク電流密度15A/cm²以上、コンタクト/電極接触抵抗、シート抵抗等直列抵抗の低減により、集光時変換効率42% 	<ul style="list-style-type: none"> ・バッファ層成長条件の最適化及びサブセルの電流整合の改善により、非集光時変換効率35.8%（AIST測定）を達成（世界最高） ・トンネル接合構造の改良（ピーク電流密度56A/cm²）、コンタクト/電極接触抵抗及びシート抵抗の改善等により、集光時変換効率42.1%（230suns、自社測定）を達成 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・集光時変換効率45%達成の為、逆積み4接合をメインに検討 ・公的機関による集光時変換効率測定 ・直列抵抗成分の更なる改善
MOVPEナノ構造形成技術	<ul style="list-style-type: none"> ・InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAsミドルセルを作製 ・1.2eV帯まで長波長側の吸収端を拡張 ・1.75eVのトップセル下でIsc=16mA/cm²（GaAs単セルの値から2mA/cm²増大） 	<ul style="list-style-type: none"> ・歪み補償量子井戸セルを作製 ・in situモニタによる歪み調整技術確立 ・階段型量子井戸で吸収端1.24eVを実現 ・障壁層の薄層化+界面制御により、GaAs単セルからの短絡電流増大3.3mA/cm²を実現 	◎	量子井戸挿入セルにおける量子井戸からのキャリア脱出メカニズムの解明による、短絡電流のさらなる増大と開放電圧の低下抑制
量子タンデムセル技術	3接合セルのGaAsミドルセルにInAs系積層量子井戸又はドットを挿入し、短絡電流2mA/cm ² の増大を達成	量子ドット挿入型GaAs中間層を用いたGaAsセルにより、GaAsセルに比べて最大6mA/cm ² の短絡電流増大を達成	◎	3接合タンデムセル、集光セルの開発

量子ドット超格子型	<ul style="list-style-type: none"> 量子ドットのサイズ揺らぎの低減10%以下 中間層膜厚10nm以下 2光子吸収過程の原理実証 セル変換効率12%以上 	<ul style="list-style-type: none"> 量子ドットのサイズ揺らぎの低減8.7%を達成 中間層膜厚15nm以下を達成 2光子吸収過程の原理実証は測定準備中 セル変換効率16.1%を達成 	◎	<ul style="list-style-type: none"> GaAs(311)B基板を用いた量子ドット成長技術の開発 歪み補償構造の更なる最適化 量子ドット構造、測定技術の開発 量子ナノ効果の寄与を実証し集光技術と融合
量子ドット超格子構造太陽電池の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> Sb導入法によるInAs量子ドット(QD)の高密度化($6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$以上) 近接積層QDの高均一化(PL半値幅20meV以下) GaNAs層による歪補償の為の構造最適化 	<ul style="list-style-type: none"> QD密度$6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$かつPL半値幅19meVのQD構造を達成 Sb導入法によりQD密度$4 \times 10^{11}/\text{cm}^2$の超高密度化(面内超格子化)を達成 Type II QD構造によりキャリア寿命5ns以上を達成 GaNAs層成長条件の検討 	◎	<ul style="list-style-type: none"> QDサイズ微小化および歪補償層、歪緩和層の導入による結晶性の向上 GaNAs歪補償層の導入による多重近接積層化 Sb導入法による面内QD超格子構造の作製技術の開発 高密度、高均一QDのセル構造への導入と特性評価
界面電荷移動遷移型セルの研究開発	界面電荷移動遷移を利用して、1eV帯領域で光電変換を達成する	新原理に基づく近赤外領域での光電変換達成	○	光電変換領域の拡張と効率向上

※達成度(平成22年度末見込)

◎: 大幅達成、○: 達成、△: 未達(次年度達成見込)、×: 未達(次年度達成見込無)

表 17. 主要な成果①(第2回中間評価時:平成23~24年度)

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
多接合太陽電池の評価解析	<ul style="list-style-type: none"> 格子不整合セルのバッファ層における転位挙動解析 変換効率45%の達成に向けたセル作製プロセスの最適化と特性向上 	<p>格子不整合系セルにおいて、</p> <ul style="list-style-type: none"> 転位密度低減に有効な傾斜組成$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$バッファ層の歪緩和過程を、3次元X線逆格子マッピングでリアルタイム観測(世界初) オーバーシューティング(OS)層の膜厚を変化させることでトップ層の歪を圧縮から引張まで制御できることを実証 シャープ(株)と連携し、4接合化に向けたバッファ層の歪緩和過程を検討中 	○	シャープ(株)との連携を強化し、転位密度低減手法を明確化
多接合太陽電池の集光動作解析	<ul style="list-style-type: none"> 集光型太陽電池の電極パターンの最適化や太陽電池セル内部抵抗の解析 高集光倍率において温度上昇の少ない構造の検討 集光条件に適した多 	<ul style="list-style-type: none"> 集光時における太陽電池セル内部抵抗による局所的な電力消費(ジュール熱)の解析に成功し各層の抵抗成分の最適化が可能となった 	◎	<ul style="list-style-type: none"> 局所的なジュール熱(発熱)や熱収支から、温度対策指針を確立し、高温動作に強い太陽電池を設計 上記解析をもとに各吸収層等の太陽電池構造の最適化設計

	<p>接合太陽電池光吸収層の設計</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・実環境下における太陽電池セルの実動作温度の測定に成功し入射光と動作温度上昇（熱収支）の関係に関する詳細な知見を得た 		
<p>多接合セル開発（格子不整合系、格子整合系）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・逆積み3接合構造セルの電流整合 ・コンタクト/電極接触抵抗、シート抵抗、トンネル抵抗等直列抵抗を低減し、最大集光倍率を向上する ・シャドーロスの低減、電極間隔、セルサイズの最適化 ・上記施策により、集光時変換効率45%を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・トンネル接合抵抗の低減、反射防止膜の最適化により、非集光時変換効率37.5%（AIST測定）を達成し、平成21年度に達成した世界記録35.8%を更新。 ・トンネル接合抵抗の低減に加え、受光面の電極間隔の最適化により、世界タイ記録となる集光時変換効率43.5%（300-500suns）を達成 	<p>◎（非集光） / ○（集光）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・直列抵抗成分の更なる改善 ・集光時変換効率48%達成の為、4接合化検討を加速
<p>量子井戸ミドルセル</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率20% ・GaAsミドルセルに量子井戸を挿入した3接合セルを作製し、$I_{sc}=16\text{mA}/\text{cm}^2$を得る 	<ul style="list-style-type: none"> ・超格子の挿入による、I_{sc}の増分$3.0\text{mA}/\text{cm}^2$、V_{oc}の低下0.02V、反射防止コーティングにより、GaAs基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率24% ・200倍集光にて超格子挿入GaAsセルの$V_{oc}=1.1\text{V}$（参照セルからの低下ほぼゼロ） ・シャープ(株)が作製したGeボトムセル上に量子井戸挿入ミドルセルを成長 	<p>○</p>	<p>量子井戸挿入上のInGaPトップセル成長をシャープ(株)にて実施しプロセスを改善</p>
<p>GaInNAsミドルセル(CBE)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・4接合太陽電池用新規1eV帯材料GaInNAsの高品質化 ・GaInNAs単接合セルにおいて、非集光時変換効率15%、集光時変換効率18%を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・CBE成膜時の表面反応制御により、N起因散乱体の密度低減を達成 ・電気的特性を劣化させる再結合中心の1つ（E1）を特定 ・GaAsN単接合セルで変換効率7.2%（Suns-Vocによる測定で13.7%：直列抵抗損失を無視）を達成 ・単接合セル効率改善の指針を明確化（現在の材料品質で変換効率16.5% 	<p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・N起因欠陥生成にかかわる成膜過程の解明と制御 ・In添加による基板との格子整合 ・セル作製プロセス（電極形成、接合界面）とセル構造の最適化 ・集光特性の検討

窒素系結晶成長の理論解析	<ul style="list-style-type: none"> 原子レベルでの表面反応プロセスの明確化 不純物（キャリア散乱体）を低減するための成長指針の提案 	を達成見込み) <ul style="list-style-type: none"> 成長条件（温度、供給ガス分圧）と表面構造の関係を原子レベルで解明 水素(H)不純物の混入機構を解明し、混入を抑制する成長指針を提案 検証実験による確認 	◎	<ul style="list-style-type: none"> 炭素(C)などの他の不純物の混入機構解析への適用 ⑤-1および⑥における結晶成長条件最適化に援用し、格子整合4接合セル変換効率48%（1,000倍集光時）の達成に貢献
GaInNAsミドルセル（水素MBE、MOVPE、量子ドット添加）	<ul style="list-style-type: none"> GaInNAs:Sb薄膜（水素MBE法）、GaInNAs薄膜（MOVPE）の高品質ヘテロ成長技術開発 タンデムセルの電流整合に向けて、電流14mA/cm²（1sun）を達成 4接合セルの第3,4セルにあたるGaInNAs:Sb/Ge2接合セルにおいて、電流7mA/cm²（1sun）を達成 3接合セルのミドルセルにInAs/GaNAs系積層量子ドットを挿入し、トップセル（1.7eV）配置下で電流16mA/cm²（1sun）を達成 	<ul style="list-style-type: none"> GaInNAs:Sb単接合セルにおいて、GaAsセル配置下で、9.6mA/cm²を達成 GaInNAs:Sb単接合セルで効率8.6% GaInNAs:Sb/Ge2接合セルにおいて電流10.9mA/cm²を達成 InAs/GaNAs積層量子ドットセルで、トップセル配置下で電流15.2mA/cm²を達成 	○	<ul style="list-style-type: none"> 4接合タンデムセルに向けて、n-on-p構造セルへの技術移転 集光セル技術の開発
広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の研究開発	単接合で変換効率5%以上を達成	<ul style="list-style-type: none"> 低直列抵抗構造+ITO電極の採用で変換効率4%（200sun）を達成（窒化物単接合では世界最高、反射防止膜により目標の5%を達成可能） 非極性面上InGaN太陽電池を試作し、1sunにおいて、窒化物系では最大の短絡電流密度>5mA/cm²を実現 多接合素子作製のためのトンネル接合形成技術確立 スパッタリングバッファにより、Si基板上への窒化物多接合太陽電池の成長技術確立し、InGaN/Si多接合素子の基礎技術を確立 窒化物太陽電池の変換効率の温度依存性を評価、Si系やCIS系の-0.4%/℃と比較して-0.18%/℃という同材料の優れた耐環境性を確認 	○	<ul style="list-style-type: none"> 非極性面上やN面上高In組成（In>0.5）InGaN成長技術確立 高正孔濃度p型高In組成（In>0.5）InGaN成長法確立

InGaN多接合セル新プロセス	<ul style="list-style-type: none"> ・InGaNを用いた電界制御型太陽電池構造の提案とその有効性の実証 ・スパッタ法を用いてIn組成0.3でキャリア移動度$200\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$以上のInGaNを作製 	<ul style="list-style-type: none"> ・スパッタ法における結晶成長モニタリング技術を開発することにより高品位化を実現し、In組成0.3のInGaNでキャリア移動度$228\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$を達成 ・In組成0.4のInGaN薄膜で世界最大の量子収率(48%)を達成 ・極性面上に電界制御型InGaN太陽電池(In組成30%)を試作し、c面窒化物系では最大の短絡電流密度を実現 ・スパッタ法による世界初の3原色LED、高電子移動度トランジスタの作製に成功 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ・高In組成InGaN(In組成>30%)のさらなる高品位化 ・電界制御型太陽電池の高効率化
ナローバンドギャップボトムセル	<ul style="list-style-type: none"> ・(H23)第3層ナローバンドギャップ材料(0.9-1.0eV)および第4層ナローバンドギャップ材料(0.6-0.7eV)の開発、およびそれらを使用した太陽電池で変換効率5%を達成 ・(H24)新型材料により、印刷型太陽電池で変換効率8%の低価格太陽電池を実現 	<ul style="list-style-type: none"> ・1eVおよび0.6eVのナローバンドギャップ材料の開発に成功 ・印刷プロセスでセルを作製し、太陽電池で変換効率5%達成 	○	新ナローバンドギャップ材料(AgInTe ₂ 、Cu ₂ Te、等)とスパッタリングを用いてナローバンドギャップセルからなる2接合太陽電池を作製し、変換効率15%を達成
近赤外吸収材と吸収増強材を組合せた3接合用ボトムセル	<ul style="list-style-type: none"> ・(H23)光電変換層(近赤外吸収材、電子・正孔輸送材)と吸収増強材を検討し、1,200nmでの吸収ならびに光増強確認 ・(H24)新素材合成(光電変換、吸収増強)および多接合化技術の課題を抽出し、1,400nm領域での光吸収ならびに光増強、多接合化に向けた接合層を検討 ・3接合ボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時$I_{sc}=12\text{mA}/\text{cm}^2$を得、変換効率4%達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・量子ドット径の調整により、1,400nm領域での光電変換達成 ・量子ドットとZnOとの電荷分離界面の拡大を狙い、ZnOナノワイヤ構造構築 ・吸収増強材料の長波長化(1,200nm以上)を実現 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・量子ドットおよびZnOの構造制御 ・ZnOナノワイヤと量子ドットを組合せた太陽電池の作製と評価 ・吸収増強材を組み込んだボトムセルの作製と評価 ・吸収増強材の最適化(吸収領域の拡張など)
量子ドット超格子セル	<ul style="list-style-type: none"> ・量子ドットの面内密度として$10^{11}/\text{cm}^2$を有する50層積層量子ドット超格子セルを開発 ・変換効率25%(低倍集光時)達成 ・2光子吸収過程の原理実証 	<ul style="list-style-type: none"> ・平均直径24nm、面内密度$5\times 10^{10}/\text{cm}^2$を有する50層積層InAs/GaNAs歪み補償量子ドット超格子セルを開発 ・変換効率20.3%(100倍集光)を達成(世界最高水準) 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs(311)B基板上InAs/GaAsSbType II量子ドットセルの最適化により、変換効率25%以上(1sun) ・光閉じ込め技術、集光技術との融合 ・量子ドット超格子における光吸収、キャリア

		<ul style="list-style-type: none"> ・中間バンドセルの動作確認を室温で実証（世界初） ・InAs/GaAsSb系Type II 量子ドットセルで効率17.3%（1 sun）を達成（世界初） 		ダイナミクスの評価結果に基づくセル構造の改良および高効率化）
超高密度量子ドットセル	<ul style="list-style-type: none"> ・面内高密度型量子ドット超格子セルを作製 ・面内密度$5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$以上を達成 ・面内高密度量子ドットの5積層構造を作製 ・非集光時変換効率15%を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・面内超高密度$6 \times 10^{11}/\text{cm}^2$を達成 ・PL測定による面内結合によるバンド化を検証 ・変換効率の量子ドット密度依存性を理論計算 ・面内超高密度量子ドット層を用いた新型量子ドット太陽電池を提案、試作 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・面内QD密度のさらなる向上 ・面内超高密度QDの多重積層化 ・新型面内超高密度QDセルの構造最適化による変換効率の向上 ・面内超高密度QD層の基本物性評価
マイクロ集積集光セル開発	多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を20%以下に抑えつつ、マイクロセルの10直列動作を達成	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs単セル表面に微細加工を施し、10直列化に挑戦。1セルのみショートし、9直列化に成功 ・バイパスダイオードをモノリシック集積し、動作を実証 ・シャープ(株)と共同しInGaP/GaAs 2接合セルのマイクロ集積化を進行中 	○	新規導入したALD装置による素子分離層完全パッシベーションで加工歩留まりを向上
光閉じ込め微細構造の開発	セル表面、裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を3倍に増加させ、短絡電流の増大を実証	<ul style="list-style-type: none"> ・高倍率集光に必須の中継光学系とセルを含めた光マネジメント構造を提案 ・半絶縁基板を用いた光マネジメント検証セルを作製（表面コンタクトセル）し、裏面テクスチャにより量子井戸の吸収増大3倍を実証 ・表面光屈曲構造を作製する為、中性粒子ビームエッチングGaAs無損傷加工の効果を実証 	◎	量子ドット中間バンドセルおよび量子井戸挿入GaAsセルに本技術を適用し、量子構造の吸収増大による効率向上を実証
表面修飾技術開発（ナノ構造修飾）	量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900-1,300nmの領域の光の吸収量が3倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実証する	<ul style="list-style-type: none"> ・金属ナノ構造の光吸収量増大効果のシミュレーション手法を確立 ・上記シミュレーションにより光吸収量増大効果に影響する構造パラメー 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・最適な金属ナノ構造形成手法の確立 ・リフトオフ素子作成手法確立と金属ナノ構造適用

		<ul style="list-style-type: none"> タを把握し、最適化することで吸収量4.5倍の金属ナノ構造を設計 量子マルチバンドセルの裏面への金属ナノ構造作製手法の検討を行い、1.4倍の光吸収量増大効果を実験的に確認 		
--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

主要な成果、達成度、今後の課題について表18、19に示す。

表18. 主要な成果②（第1回中間評価時：平成20～22年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ヘテロ接合デバイス化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 微結晶SiGe発電層での試作と温度特性評価（ヘテロ接合界面制御の影響調査） ヘテロ接合デバイスの作製および評価（単接合太陽電池で変換効率8%） 	<ul style="list-style-type: none"> バッファ層挿入により特性改善 Geに対し特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効であることを見出し、4.23%まで向上 	○	<ul style="list-style-type: none"> 無し（済み） 界面処理効果の分析と最適化、基板面方位と抵抗率の最適化、構成膜の最適化（ヘテロ材料、反射防止膜の適用など）
構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> 光吸収層のバンドギャップ分布制御（キャリア寿命1ns以上） 界面制御技術（開放電圧0.9V以上） 裏面コンタクト制御（量子効率90%以上） 	<ul style="list-style-type: none"> バンドギャップ制御に成功し、不純物混入防止で効率3.8%達成 開放電圧0.74V達成 シミュレーションから短絡電流増加に目処 	○	<ul style="list-style-type: none"> バンドギャップ分布制御を最適化しキャリア寿命測定法立上げ 界面層と光吸収層の相互拡散抑制 裏面コンタクト層形成法の確立
革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> GaAs基板上InAs、InGaAs量子ドット太陽電池を開発し、 10層以上量子ドット超格子の中間バンド形成の確認 InAs、InGaAs系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%（最終目標） 	<ul style="list-style-type: none"> 20層InGaAs量子ドット超格子のミニバンド形成確認 12.6%ですでに達成 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ミニバンド形成した量子ドット超格子の太陽電池への応用 中間バンド太陽電池の動作実証
ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討B	<ul style="list-style-type: none"> 高純度半導体単層CNTを抽出する技術開発（90%以上） 半導体単層CNTのバンドギャップ制御（バンドギャップ0.2-1.3eV、開放電圧0.1-0.5V） バルクヘテロ接合CNT太陽電池の量子効率の最大値を50%以上とする 	<ul style="list-style-type: none"> 95%以上 バンドギャップ0.8-1.3eV、開放電圧0.14-0.57V 量子効率の最大65%（最高73%） 	◎	<ul style="list-style-type: none"> 純度99%以上、抽出率10wt%以上とする 平均直径1.1nm以上の単層CNTを用いてバンドギャップ0.6-1.3eVを達成 広いエネルギー範囲で量子効率の最大値を70%以上
メカニカルスタック技術の開発B	<ul style="list-style-type: none"> 透明導電性接着剤特性（透過率70%以上、接合 	<ul style="list-style-type: none"> 透過率80%、接合抵抗$2.5\Omega\text{cm}^2$ 	○	<ul style="list-style-type: none"> 低抵抗化、大面積均一化

	抵抗 $0.5\Omega\text{cm}^2$) ・多接合セル実証（ソーラーセルによる2端子セル作製）	・ソーラーセルによる2端子セル作製成功	◎	・多種類のセルにおける実証
高性能透明導電膜の開発	・エネルギー損失窓電極の開発（近赤外領域：400～1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3\times 10^{-4}\Omega\text{cm}$ 以下、波長1,700nmにおける吸収係数 $6.0\times 10^3/\text{cm}$ 以下を同時に達成 ・200℃以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する	最大プロセス温度200℃において抵抗率 $2.2\times 10^{-4}\Omega\text{cm}$ 、波長1,700nmの吸収係数約 $5\times 10^3/\text{cm}$ と中間目標を上回る特性を得た	◎	可視高移動度を維持した状態で更に低抵抗率化を図る

※達成度（平成22年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表 19. 主要な成果②（第2回中間評価時：平成23～24年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	・接着抵抗 $2\Omega\text{cm}^2$ 以下、吸収損失10%以下の接合技術開発 ・多接合太陽電池で変換効率20%達成	・媒体接着および直接接合技術を検討し、特に後者でナノ粒子配列を用いた技術を開発、接着抵抗 $2\Omega\text{cm}^2$ 以下、吸収損失2%以下達成 ・直接接合法により（GaInP/GaAs）2接合太陽電池とInGaAsP太陽電池を接合した太陽電池で変換効率21.85%を達成	◎	・接合技術高度化（接着条件等の最適化） ・様々な種類の太陽電池への適用を試みるとともに、実用化に向けて信頼性の確認など
メカニカルスタック技術の開発	4インチ以上、シリコン以外の材料の貼合わせ技術	高圧ガス加圧法を用いたプレス技術による貼合せ接合技術を開発し、4インチGe及びGaAs基板の貼合わせに成功（成功率100%）	◎	Ge、GaAs、CIGS等ソーラーセルの接合試験、6インチ実用セル試験
ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	単接合太陽電池の変換効率9%達成	Ge単接合太陽電池で変換効率6.54%	○	a-Si:H(i)層製膜条件の最適化、各種界面評価手法でのデバイス評価及びデバイス作製条件の最適化など
高度光利用技術の開発A	相対効率向上15%以上	相対効率8%向上	○	光学シミュレーションを通して明確化した、現状基板比で30%の効率向上を実現するフォトニック基板の具体的設計及び作製プロセスに従い素子を試作し、プラズモン効果の確認と結果の計算へのフィードバックを行うことで最適化
SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	薄膜中の転位密度を低減	組成傾斜バッファ層の導入により転位密度の大幅な低減（当	◎	・薄膜中の点欠陥の制御と密度低減 ・高ゲルマニウム組成傾

		所従来構造比1/1,000以下の $10^6/cm^2$ 台以下)に成功		域に適応可能な新規バッファ層構造の開発
SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	ガラス基板上SiGe等単結晶薄膜を基体としたバンドギャップ0.9eV以下の単接合太陽電池で、変換効率9%またはそれに相当する過剰キャリア寿命を達成	<ul style="list-style-type: none"> Si基板上にバッファ層なしで成長した$Si_{0.2}Ge_{0.8}$膜/a-Siヘテロ接合セルで1,400nm(0.89eV)までの分光感度を確認 ガラス上Si薄膜基板に$Si_{0.5}Ge_{0.5}$膜を成長する際に傾斜組成SiGeバッファ層を挿入することで、過剰キャリア寿命が0.062μsから16.3μsに向上 	○	SiGe単結晶薄膜中の不純物および転位密度の低減、ドーピング、電極取出し構造などの最適化
有機単結晶材料ボトムセルの開発A	有機単結晶を用いた単接合で変換効率4%を達成	有機結晶/無機太陽電池で3.1%、電極/p型界面ドーピングにより2.6%	○	活性化率の高いMg以外のn型ドーパントの探索及び界面ドーピング
ナノ材料系ボトムセルの開発A	高純度半導体単層CNTの大量抽出技術開発(純度99wt%以上、抽出率20wt%以上)	200°C、1時間、真空中で加熱し、残分(主にPF0ポリマー)を取り除き、純度を向上することで半導体CNTの純度99wt%と抽出率30wt%達成	◎	大量抽出技術開発
ナノ材料系ボトムセルの開発B	pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率4%を達成	熱拡散法により合成したカリウム内包半導体CNT太陽電池において、1,550nmで3.8%、1,650nmで11.4%を達成	◎	プラズマイオン照射法のイオン照射エネルギー等の制御により内包率を向上させたセシウム内包半導体CNT太陽電池において、変換効率10%実現
ナノ材料系トップセルの開発B	<ul style="list-style-type: none"> ナノ結晶シリコン自立膜の作製と大面積化(直径:1-10cm) 自立膜による単層セル作製技術を確認し、変換効率10%を達成(Voc=0.7V、Jsc=18mA/cm²、FF=0.8) 	<ul style="list-style-type: none"> p型、n型、pn接合基板の全てで自立膜の作製法を確認し、直径8cmの自立膜作製にも成功 電極堆積法を固め、自立膜セルを実現し、Vocは目標を大きく上回る0.87Vを得たが、JscとFFについては向上が必要 	◎ △	<ul style="list-style-type: none"> ナノ結晶シリコン自立膜の薄型化 単層膜では内蔵電界が不十分な為、自立膜をより薄くし、両端にヘテロ接合を構成することで内蔵電界を高め、変換効率の増大を図る(26年3月達成予定)
化合物系トップセルの開発A	InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率10%	InGaP/InGaAs系量子ドット成長技術を開発し、太陽電池の変換効率10.3%	◎	Vocの向上による変換効率の向上
化合物系トップセルの開発B	<ul style="list-style-type: none"> 内部量子効率90%以上 光吸収層のバンドギャップ以下の波長の全線透過率80%以上 	<ul style="list-style-type: none"> 波長390nmで量子効率90%達成 全線透過率70%以上達成 	○ ○	<ul style="list-style-type: none"> 相互拡散抑制構成でのZCIS膜の高温製膜によるバルク再結合低減 界面層、挿入層、光吸収層の屈折率と膜厚の整合

※達成度(平成24年度末見込)

◎:大幅達成、○:達成、△:未達(次年度達成見込)、×:未達(次年度達成見込無)

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
 主要な成果、達成度、今後の課題について表 20、21 に示す。

表 20. 主要な成果③（第 1 回中間評価時：平成 20～22 年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ナノドット禁制帯幅制御	シングル接合セルで変換効率5%を達成	<ul style="list-style-type: none"> ・ SiC/Siナノドットに酸素添加することにより変換効率の大幅アップを実現し、世界最高の開放電圧518mVを達成 。ITO側から光照射する構造で光電流 $5.4\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成 ・ 現状で得られている V_{oc}、I_{sc}、FF それぞれの最高値が同時に達成できれば3.8%の変換効率 	◎	ITO側から光照射する構造の最適化、膜剥離の問題の解決
薄膜新材料	アモルファス/微結晶化合物薄膜ならびにゲストフリーSiGe系クラスレート薄膜の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ アモルファスInGa Nで光感度252倍を達成 ・ 約1.5eVのバンドギャップのSiクラスレートで、世界で初めて光電気伝導度$\sim 1 \times 10^{-7} \text{S}/\text{cm}$を観測 	○	一層の高品質化により欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ を実現
ワイド/ナローギャップ材料設計	ナローバンドギャップ材料の設計 (0.6-1.0eV)	CuIn($\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$) ₂ 系のx=0.5で $E_g=0.88\text{eV}$ が得られた	◎	薄膜の一層の高品質化
シリコン系薄膜集光型セル	低倍率集光で真性変換効率20%	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微結晶Si太陽電池では、低倍率集光で変換効率が大幅にアップ (1sun 8.7%、7suns 9.4%) することを世界で初めて見出し、a-Si/mc-Siタンデムセルで変換効率10.1%、高電圧型a-Si0/a-Siタンデムセルで9.4% (開放電圧1.92V) を達成 ・ 現状技術でトリプルセルを接合すれば、16%程度の変換効率が得られることを理論解析で明確化 	○	シリコン薄膜系2接合、3接合太陽電池の最適設計と、低倍率集光特性の検討
サブセル界面接合技術	サブセル界面トンネル伝導構造の開発によりサブセル界面抵抗 300mWcm^2	サブセル界面抵抗 500mWcm^2	○	成膜条件、ドーブ濃度等の最適化、材料の組合せ、後続プロセス条件の最適化
カルコパイライト系集光型セル	低倍率集光時において真性変換効率20% (単接合、有効受光面積 1cm^2)	バンドギャップ約1.1eVのCIGSを用いて、約7倍集光により、変換効率20.3%を	◎	1.4eV帯、高Ga組成CIGS太陽電池の効率向上によるミドルセル用太陽電池の開発

放熱基板カルコパイライト系集光型セル	<ul style="list-style-type: none"> ・CuInTe系薄膜形成と太陽電池の試作 ・放熱基板上でのCIGS太陽電池で変換効率20% 	<ul style="list-style-type: none"> ・CuInTe薄膜の低温製膜技術(200℃)を確立し、変換効率5%(非集光) ・金属基板上CIGSセルで18%(非集光) 	○	Teフラックス制御および不純物効果による更なる高効率化、集光時の動作確認
光学設計技術	新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池を提案し、数値計算により3%の変換効率向上を確認 ・世界で初めて微結晶シリコンセルとCISセルの直列タンデム構造の作製に成功 	◎	新規太陽電池セル作製方法の検討と、光学調整を中心とする構造最適化の検討
p型透明導電膜	基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10\text{S/cm}$ を達成	<ul style="list-style-type: none"> ・禁制帯幅$E_g(\text{CuAlO}_2) = 3.1\text{eV}$、$E_g(\text{新材料}) = 2.6\text{eV}$ ・可視光透過率80%(新材料) ・電気導電率21S/cm(新材料) 	◎	開発したp型透明導電膜を用いて、アモルファスSiシングル接合セルを作製し、セル特性からp型TCO利用の特質を明確化
グラフェン透明導電膜	グラフェン成膜技術の開発(導電率 $6 \times 10^3\text{S/cm}$ 以上、透過率80%以上@380-2,000nm)	導電率 $2 \times 10^4\text{S/cm}$	○	MBEによるエピ成長技術開発

※達成度(平成22年度末見込)

◎:大幅達成、○:達成、△:未達(次年度達成見込)、×:未達(次年度達成見込無)

表 21. 主要な成果③(第2回中間評価時:平成23~24年度)

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
シリコン系薄膜集光型セル	<ul style="list-style-type: none"> ・a-Si₀、a-Si、a-SiGeCならびに$\mu\text{c-Si}$からなる低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率20%を達成 ・シリコン系薄膜太陽電池、ならびに第4層、第5層セルと組み合わせた5接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率25%(開放電圧3.72V、短絡電流9.0mA/cm²、曲線因子0.75、10倍程度の集光時)を達成 ・透明裏面電極を適用し、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・光学的な損失を極限まで減少させるa-Si/$\mu\text{c-Si}$タンデム型太陽電池を考案し、1sunでの変換効率13.6%を達成 ・シリコン薄膜太陽電池とCIGSセルとを組み合わせた波長スプリット型薄膜フルスペクトル太陽電池を作製したところ、薄膜系では世界最高の変換効率21.8%(1sun)を達成 ・透明裏面電極用のアクセプタドーピング法により14.9%を得た。 	◎(非集光) / ○(集光)	<ul style="list-style-type: none"> ・集光時は15%以上が得られる見通し ・波長スプリット型セルの集光動作により、変換効率25%は達成可能 ・アクセプタ添加や熱処理による効果を明らかにし、ITO、ZnO等についても検討(25年9月達成予定)
広バンドギャップシ	広バンドギャップi層を用	$E_g = 1.90\text{eV}$ のi層、 E_g	○	透明導電膜とp層の界面

リコン系薄膜	いた単接合セルにて、開放電圧1.06V（低倍率集光時1.16V）、短絡電流密度9.0mA/cm ² （有効面積1cm ² ）を達成	=2.11eVのp層にて、開放電圧0.996V、短絡電流密度11.6mA/cm ² （有効面積1cm ² ）を達成		にバンド構造制御層を導入
カルコパイライト系トップセル	ワイドギャップCu(In,Al)S ₂ （CIAS）太陽電池で、変換効率6%を達成	<ul style="list-style-type: none"> 変換効率2.0%（E_g=1.7eV）と1.0%（E_g=2.0eV）を得た 多接合を実現するための引き剥がし基礎技術を確認 	○	CIASの高品質化、新型バッファによるセル構造最適化
InGaN薄膜	禁制帯幅2eV程度のInGaN薄膜を用いた単接合太陽電池において1SUNで1.10V、10SUNで1.20Vの開放電圧を達成	<ul style="list-style-type: none"> InGaN（禁制帯幅2.36eV）を用いた単接合太陽電池（p型a-SiC/i型a-Si:H/i型InGaN/n型InGaN構造）において、1sunで開放電圧0.58V（変換効率1.57%）を得た p層とバッファ層にa-SiOを用いたトップセル用単接合太陽電池で、初めて太陽電池動作を確認し、開放電圧0.16V（変換効率0.13%）を得た 	△	作製条件の調整等によるInGaNの更なる高抵抗、高光感度化と、InGaN光吸収層に適したp層材料ならびに接合界面へ挿入するバッファ層を探索し、単接合太陽電池において1sunで1.10eV以上の開放電圧を達成（26年3月達成予定）
Si量子ドット禁制帯幅制御	TiO ₂ :Nbを高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリア層として用いた禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太陽電池で変換効率7%を達成	TiO ₂ :Nb膜によりドーパントの拡散を抑制することに成功し、禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太陽電池にて、世界最高の変換効率0.39%、低倍率集光下で開放電圧649mVを達成	△	<ul style="list-style-type: none"> 水素プラズマ処理条件の最適化によるSi量子ドット層の高品質化 Si量子ドット層の厚膜化による短絡電流密度の向上（26年3月達成予定）
ナノドット量子効果による薄膜形成技術	ナノドット量子効果を検証し、変換効率10%（低倍率集光時）を実現	ドットの高密度化（70wt%）を達成し、ナノドットの量子サイズ効果を確認。ウエットプロセスで形成したナノドットとn型a-Si膜を組み合わせた太陽電池セルにおいて、世界最高のV _{oc} 0.71Vを達成（変換効率2.02%）	○	高V _{oc} の特徴を生かしたセル構造の最適化により、変換効率10%達成見通し
カルコパイライト系集光型セル	a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成	波長614nmのスプリットティングにより、AIGS/CIGS太陽電池において変換効率12.2%及びトップセル用AIGS、ミドルセル用CIGS太陽電池において開放電圧0.976V、0.770Vを達成	○	<ul style="list-style-type: none"> 波長スプリットティングによるタンデム太陽電池の効率向上、並びに直接ボンディングによるタンデム太陽電池の実現 AIGSおよび高Ga組成を有するカルコパイライト材料の高温製膜による高品質化、およびセル化による実証
歪Ge	ダブルヘテロ接合型太陽電池を作製し、1.1eV以下	ダブルヘテロ接合型バルクGe太陽電池を	○	<ul style="list-style-type: none"> バルクGeを用いたダブルヘテロ接合太陽電池

	の低エネルギー光照射下において変換効率1.35%（非集光）を達成	作製し、AM1.5、100 mW/cm ² 照射下において変換効率2.31%（非集光）を達成		による高効率化技術の確立 ・歪Ge層を光吸収層としたダブルヘテロ接合太陽電池の作製
非真空CuIn(Se, Te) ₂ 膜	第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率2%（低倍率集光時）	非真空プロセスでCuIn(S _{0.5} Te _{0.5}) ₂ 膜を作製し、禁制帯幅=0.87eVを確認	○	0.7-0.87eVで禁制帯幅の制御が可能な新材料を開発し、非真空プロセスでCuIn(S _{0.5} Te _{0.5}) ₂ 膜および新開発膜を用いて第5層セルを試作
蒸着CuInTe ₂ 系セル	CuInTe ₂ 系ボトムセルで変換効率2%（低倍率集光）	CuInTe ₂ セルで変換効率4.4%（5suns）、CuIn ₃ Te ₅ セルで変換効率7%（1sun）を達成	○	CuInSe ₂ との混晶化によるCuIn(SeTe) ₂ 薄膜作製とキャリア濃度制御および禁制帯プロファイル制御による高効率化
p型透明導電膜	<ul style="list-style-type: none"> ・Eg>3.0eV、σ>300S/cmを達成 ・p型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用してp型透明導電膜の有効性を確認し、従来のSnO₂やZnOよりも開放電圧50mV以上の増加を目指す ・p型透明導電膜をCIGS太陽電池等の下部電極として適用し、従来用いていた電極と同等の特性を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ・Eg=2.6eVのCu-Nb-O系薄膜（特許出願済）で、可視光透過率70%、116S/cmを達成 ・Eg=3.6eVのNiO薄膜で可視光透過率74%、104S/cmを達成 ・Eg=3.6eVのNiO系材料（特許出願済）で可視光透過率59%、180S/cmを達成 ・BaCuSeF等のp型TCOを化合物系太陽電池の裏面電極に適応し、太陽電池特性を確認 	○	Eg=3.6eVのNiO系材料について、特性の向上を図るとともに、薄膜形成時の基板温度の低温化に取り組み、シリコン系薄膜太陽電池およびCIGS太陽電池等に应用展開
フルスペクトルTCO	波長400-2,000nmでの平均光吸収率が7%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、抵抗率1×10 ⁻³ Ω cm以下を達成	<ul style="list-style-type: none"> ・SnO₂:Fで移動度81.3cm²/V·sを達成（世界最高） ・RIEガラス上に高移動度膜を作製する技術を開発 ・平均吸収率6.1%、ヘイズ率77%（1,000nm）、65%（1,200nm）、抵抗率9×10⁻⁴Ω cm（Fドープ層）達成 	○	ガラス形状の微調整でヘイズ率を向上
グラフェン透明導電膜	<ul style="list-style-type: none"> ・シート抵抗30Ω/□以下、透過率90%以上@380-2,000nmのグラフェン薄膜を得る ・ITOなどのn型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧が50mV以上増加すること 	シート抵抗121Ω/□、透過率90%を達成（4層換算）	○	<ul style="list-style-type: none"> ・キャリア密度を1×10¹³/cm²から5×10¹³/cm²に増加させ、現状のシート抵抗を1/5にする ・太陽電池への適用実験を行い、開放電圧向上の効果を確認
サブセル界面接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・サブセル界面抵抗として200mΩ cm²（測定電流密度0.5A/cm²）を得る ・太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（～50倍）時の曲線因子0.75以上 	<ul style="list-style-type: none"> ・サブセル界面接合層として低抵抗酸化半導体p/n接合層を開発し、サブセル界面接合抵抗として80mΩ cm²（測定電流密度0. 	○	太陽電池多接合セルでの最適化を実施し、曲線因子0.75以上を達成

		5A/cm ²) を達成 ・ a-Si/ μ c-Si タン デムセルに適用し 曲線因子0.72を得 た		
光学設計技術	・5接合太陽電池の組み合 わせに最適な光学制御 構造を設計 ・オプティカルスプリッ タの光学的損失を8%以 下まで低減し、カット 波長を任意に変更でき ることを確認	オールシリコン系の 擬似薄膜フルスペク トル太陽電池構造で 21.9%の変換効率を 確認	◎	更なる反射/透過特性の 向上
表面プラズモン	特定の波長に対して反射/ 透過する金属ナノ粒子膜 を、a-Si ₀ /a-Si/ μ c-Si ト リプル接合セルの裏面反 射膜として作製し、 μ c-S i ボトムセルからの光電流 を2mA/cm ² 以上向上	金属ナノ粒子膜をa- Si ₀ /a-Si/ μ c-Si ト リプル接合セルの裏 面反射膜として用い た場合1.68mA/cm ² 程 度の電流密度増加が 期待できる“SiO ₂ 膜 によって安定化され た”金属ナノ粒子膜 の作製に成功	○	金属ナノ粒子膜の作製方 法をさらに工夫するなど し、トリプル接合セルの 裏面反射膜として、ボト ムセルからの光電流を2 mA/cm ² 以上向上

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

主要な成果、達成度、今後の課題について表22に示す。

表22. 主要な成果④（第2回中間評価時：平成21～22年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
集光型太陽電池屋内 評価技術	従来の単接合太陽電池の 高精度評価技術をベース として、3接合以上の多接 合で集光倍率500倍以上に 対応できる国際的整合性 を持った高精度な評価技 術を開発	・集光倍率500倍以 上で集光型多接合 太陽電池セルを高 精度に測定可能な 技術を開発し、NR ELと共同で測定精 度について検証 ・集光型太陽電池ユ ニット評価を光線 平行度約0.5度以 内の定常光で高精 度に評価する技術 を開発	○	・1,000倍以上の照度へ の対応、測定精度の不 確かさの検証や改善検 討 ・国際比較測定の継続等 による、整合性の高い 評価技術の確立、標準 化 ・集光型太陽電池発電量 評価技術の確立 (IEC62670-2 Draft) ・集光型太陽電池出力の 補正技術の開発 (IEC62670-3 Draft)
集光型太陽電池屋外 評価技術	集光型太陽電池システム を日米両国に設置し、屋 内評価結果と併せて屋外 での性能評価技術を開発	・国内外の3種の多 接合型太陽電池を 使用した集光型太 陽光発電設備（30 kW）を岡山市とコ ロラド州に設置し 、異なる気候環境 下での実際の発電 データを取得 ・各種気象条件およ び設置精度がおよ ぼす集光型太陽電 池システムの発電 性能を実証的に明 らかにした	○	・CPVに特有なアライ メント等を考慮した高 精度な発電量評価技 術開発と検証、標準化 ・集光型太陽電池発電量 評価技術の確立 (IEC62670-2 Draft) ・集光型太陽電池出力の 補正技術の開発 (IEC62670-3 Draft)

<p>革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術</p>	<p>従来より広いスペクトル領域で感度特性を有するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ Si系以外および3接合以上を含めた多接合太陽電池モジュール（集積型構造）の高精度な性能評価に対応可能な技術を開発し、基本的性能を検証 ・ 新概念太陽電池等、集光用太陽電池の性能評価に重要となる照度、面性等の定義測定方法について日米で議論し整合を図った 	<p>○</p>	<p>新型薄膜モジュールでの評価精度、整合性検証</p>
<p>革新的薄膜多接合太陽電池信頼性評価技術</p>	<p>革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材、組成、不純物等の評価および基本的な光、熱等の環境に対する信頼性を検証</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ CIGS 光吸収層の中に形成されるミクロンサイズの粒子の組成分析を行いCIGS膜の性能を阻害する要因を元素とそのサイズに関して明確にした ・ 光電子分光測定と分光エリプソメトリー装置等を用いたバンドギャップ測定より得られるヘテロ接合界面のバンドオフセット量評価が新規太陽電池開発に有効である事をa-Si_{1-x}Ge_x:H/c-Geヘテロ接合型太陽電池を用いて確認 ・ 薄膜X線回折を用いてルブレ結晶上に成長させたC60結晶の面内方位分布の測定を行い、高品質の有機単結晶が得られていることを確認 ・ Si量子ドットの過渡発光スペクトル測定によりSi量子ドット/有機ハイブリッド型太陽電池を評価 ・ 走査型プローブ顕微鏡により薄膜多接合太陽電池に用いられる中間層材料/透明導電材料の評価を実施し、微視的組成や特性と電気特性との相関を明らかにした ・ UV光を照射し集光用レンズ部材（ア 	<p>○ ○ ○ ○ ○</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ これらの手法をより発展させ、デバイス構造を有する試料およびデバイスの評価へ展開 ・ 各種部材のUV光への耐性を評価し部材開発へ

		クリル)の光照射試験前後での材料特性変化を評価		フィードバック
--	--	-------------------------	--	---------

※達成度（平成22年度末）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）

主要な成果、達成度、今後の課題について表23に示す。

表23. 主要な成果⑤（第2回中間評価時：平成23～24年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	Ⅲ-V-N新材料、Ⅲ-VオンSi新構造の評価解析技術を確立	<p>【Ⅲ-V-N新材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> 偏光、時間分解FT-IR測定により、N-H欠陥の構造や電荷状態に関する知見を得た 欠陥解析結果をフィードバックし、(In)GaAsNセルの効率向上を達成 <p>【Ⅲ-VオンSi】</p> <ul style="list-style-type: none"> 成膜時のその場X線逆格子マッピングを実施し、透過型電子顕微鏡観察と合わせて、欠陥を解析 新規バッファ層による欠陥低減を検討 <p>【量子ナノ構造】</p> <ul style="list-style-type: none"> PPT法、PL法、SPV法を組み合わせて、量子ナノ構造のキャリア再結合過程を解析 	◎	Ⅲ-V-N新材料、Ⅲ-VオンSi新構造、量子ナノ構造の基礎的理解と品質向上に向け、さらなる評価、解析の継続
集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	量子・ナノ材料、構造におけるキャリア励起・緩和ダイナミクス、キャリア寿命等の評価解析技術、また量子・ナノ構造セル特性評価解析技術を確立	<ul style="list-style-type: none"> 歪補償InGaAs/GaAs量子井戸集光型セルのデバイス構造決定 高速PL減衰測定による量子ドット内の非輻射再結合、量子井戸内のホットキャリア評価 	○	<ul style="list-style-type: none"> 量子ナノ構造の基礎的理解と品質向上に向け、さらなる評価解析の継続 量子井戸、量子ドット効果の明確化
先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	セル変換効率42%以上を達成	<ul style="list-style-type: none"> 逆エピ成長、直列抵抗損失、シャードイング損失低減によるInGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの高効率化 FhG-ISEによる世界最高効率43.5%（240-306倍集光）の認定 逆エピ構造InGaP/GaAs/InGaAs集光型3接合セルのWP4への提供 	◎	<ul style="list-style-type: none"> 効率45%以上の世界最高効率集光型太陽電池の実現 先進集光型3接合セルのWP4への提供の継続 サブセルのWP1、WP2への提供の継続

		<ul style="list-style-type: none"> • Geボトムセル等のWP1、WP2への提供 		
集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	各種集光型太陽電池の200倍から1,000倍程度の集光時に於ける性能評価において、測定精度の検証と高精度化のための課題の明確化	<ul style="list-style-type: none"> • FhG-ISEとのCPVセルラウンドロビンを実施し、1sun下での性能比較で1.8%（相対値）以内での測定結果一致を確認 • CPVセル測定技術の改善 • CPVモジュールのラウンドロビン測定準備 • CPVモジュールの測定技術の改善 	○	<ul style="list-style-type: none"> • CPVセルの標準測定技術の確立 • CPVモジュールの標準測定技術の確立
高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	モジュール変換効率33%以上を達成し、既存集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析を完了	<ul style="list-style-type: none"> • 集光型モジュール要素技術の改善（光学系、熱管理、信頼性） • ミニモジュール変換効率31.62%（～300cm²） • UPM、宮崎大へのCPVモジュールの提供 • 50kWCPVシステム用CPVモジュールの製造、設置 	○	<ul style="list-style-type: none"> • 当面、変換効率34%以上の高効率CPVモジュールの実現 • 50kWCPVシステム実証試験、評価 • CPVシステムの発生電力予測 • CPVシステムの最適化

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

2. 個別テーマの成果概要

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

【平成 20～22 年度】（第 1 回中間評価時）

1) 4 接合太陽電池の研究開発（豊田工業大学、再委託：九州大学）

<H22 中間目標：InGa_n 単接合太陽電池で変換効率 15%（非集光）。H26 最終目標：シャープ(株)と協力し AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/（Ge または InGaAs）4 接合セルにおいて、変換効率 35%（非集光）、変換効率 45%（1,000 倍集光）>

a) InGaAsN 材料の成膜過程の解明と高品質化

N 添加の効果を明らかにするため、In を添加しない GaAsN 材料の成膜を検討した。成膜時の表面反応過程の制御には、基板表面のステップ密度制御（微傾斜 GaAs[001]基板使用）、成膜速度制御の 2 つの手法を試みた。これまで、GaAsN 材料の移動度を低下させる N 起因の散乱体密度は、MBE 法や MOCVD 法など、その成膜方法によらず、N 濃度に比例することが報告されていた。一方、本研究開発で上記の 2 つの手法で表面反応を制御した GaAsN 膜では、N 起因の散乱体密度を大幅に減少できることを世界で初めて示した。これは、従来限界と考えられていた N 添加によるキャリア移動度の減少を、他の方法に比べて CBE 法では大きく改善できることを示すものである。また、キャリア寿命を評価した結果、成膜速度減少とともにキャリア寿命の大幅な改善を確認した。窒素濃度 0.85% の GaAsN 膜で 0.9ns のキャリア寿命を達成し、さらにこの試料をアニール処理することにより、1ns を超えるキャリア寿命を得た。これは、太陽電池化した時に単接合で変換効率 10%以上が期待できる値である。低成膜速度の CBE 法は、キャリア移動度、キャリア寿命の両方の改善に有効であることが示された。

b) III-V-N 系半導体成長シミュレータの研究開発（九州大学）

III-V-N 系（In）GaAsN 系）太陽電池開発では、N に関連した点欠陥の導入が電子（正孔）の散乱を引き起こし、ひいては変換効率の低下を招くことが見出されてきている。本研究開発では、まず、熱力学解析手法を基本とするシミュレーションコードの開発を行い、世界で初めて III-V-N 系半導体薄膜の組成（N 取り込み量）予測シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、第一原理計算を基本とする解析を用いて、格子歪み、構造多形（立方晶/六方晶）が N 取り込み量に与える影響を考慮している。また、各種 V 族原料ガスと N 取り込み量の関係を検討するため、各種生成反応に対する平衡定数の解析を行った。As 系原料の反応に関する物性（平衡定数）の系統的なデータを公表するのも世界初である。今後、豊田工業大学と九州大学との連携を更に強化して共同研究を進展させ、ここで求めた N 取り込み量と N に関連した点欠陥の導入プロセスを原子レベルで解析し、III-V-N 系多接合太陽電池の変換効率向上に貢献する。

c) InGaAsN 材料の電子物性と欠陥制御

過渡容量分光（DLTS）法を用いて GaAsN 材料中の欠陥評価を行い、複数の電子捕獲準位の存在を明らかにした。本研究開発で見出した再結合中心が InGaAsN 材料における特性劣化の主要な原因である事が示唆された。GaAsN 材料中の N-H 複合欠陥に関して、起源及び構造に関して検討を行い、N-H 結合に起因した複数の赤外吸収ピークが、異なる欠陥構造のピークである事を明らかにした。フォトルミネッセンス（PL）測定で得た発光スペクトルの解析から、GaAsN 材料のバンドギャップ、およびバンド端近傍の欠陥準位について検討した。特性劣化との関係が指摘されている発光について、その起源に関する考察を行った。

d) InGaAsN 単接合セルの開発評価

Si ドープ n 型 GaAsN とアンドープ p 型 GaAsN とのホモ接合で単接合セルを試作し、良好な pn 接合特性を得た。セル構造の最適化がまだ不十分であり、少数キャリア寿命 0.1 ns の GaAsN 膜（N 組成 0.6%）を用いた単接合セル（反射防止膜無し）で、変換効率 4%（V_{oc}=0.625V）と低いが、従来の結果に比べて高い V_{oc} を実現した。上記 1ns の少数キャリア寿命を有する GaAsN 膜を用いることにより変換効率 10%以上の達成の見通しを得た。さらには成膜条件とセル構造の最適化で効率 15%以上の中間目標の達成が見込める。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：16（13）、研究発表・講演：143、新聞・雑誌等への掲載：7、展示会出展：5

2) 多接合太陽電池集光動作解析（豊田工業大学、再委託：宮崎大学）

<H22 中間目標：シャープ(株)と協力し変換効率 42%（集光時）。H26 最終目標：InGaAsN 結晶成長技術及びシャープ(株)と協力して、3 ないし 4 接合セルにおいて、変換効率 45%（集光時）>

a) 転位挙動の解析と転位密度低減

格子不整合系 1.7eV/1.2eV/0.67eV の 3 接合セルの実現の為、格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法による転位挙動解析を行った。大型放射光施設 SPring-8 の MBE-XRD 装置により、InGaAs/GaAs[001]成長中の歪緩和の様子を 3 次元逆格子マッピングにより世界で初めてリアルタイム観測した。この結果を基に、InGaAs の歪緩和の面内非対称性の発現、消失の起きる膜厚領域の同定と転位のすべり運動を阻害するブロッキング過程を反映した歪と結晶性の膜厚変化を得た。

さらに、本手法を、転位密度の低減に有効とされる傾斜組成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ バッファ層に応用し、歪緩和のリアルタイム解析を行った。その結果、In 組成の高い 2 層目の成長が 1 層目の歪緩和を促進していることが確認できた。本手法を傾斜組成 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ バッファ層に応用することで、各 InGaAs 層の歪緩和過程を同時に解析でき、転位密度の低減に有効なバッファ層の構造設計に有用であることが示された。本知見は、シャープ(株)が達成した格子不整合系 3 接合セルの高効率化 (非集光時 35.8%、集光時 42.1%) に、間接的に寄与した。今後、シャープ(株)との連携をさらに強化することで、格子不整合系 3 接合セルの集光時の効率 45% (最終目標) の達成に寄与する。(シャープ(株)は中間目標の集光時の効率 42%を達成済)

b) 集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析 (宮崎大学)

集光型太陽電池には光学系により様々な面内分布や色収差を持った光が入射され、それらの分布を考慮した太陽電池開発が必須となる。本研究開発では、照射光の分布を 3 次元 (3D) 的に考慮することができる 3D 多接合型太陽電池等価回路を開発した。このモデルを用いて計算した多接合型太陽電池の集光時動作特性が実測値と一致することを確認し、本研究開発により導出されたパラメータおよびモデルが適当であることが示された。また、この手法は太陽電池温度が変化したときにも有効であることを実測値との一致により示し、集光動作をより詳細に解析できるようになった。光学計算手法を確立し、レンズ等の光学系により太陽電池にどのような分布の光が照射されるかを計算することが可能となった。さらに、3D 等価回路モデルを組み合わせることにより、どのような光学系を用いると、どのような太陽電池特性が出力されるかを総合的に計算することが可能となった。本手法を活用することにより、光学系から太陽電池構造までを総合的に最適化設計することが可能となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 36、新聞・雑誌等への掲載 : 12、展示会出展 : 5

3) 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の研究開発 (名城大学)

<H22 中間目標 : 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて変換効率 5%を達成する。H26 最終目標 : 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討をし、単接合セルで変換効率 10%以上を達成し、かつ、多接合セル作製の為の要素技術を確立する>

当初予定していた中間目標を達成するために、着実に実施内容を遂行している。平成 22 年度も順調に研究を遂行することによって、当初目標とした変換効率 5%という AlGaInN 太陽電池を単セルで実現できる見込みである。また、LED と太陽電池を同一素子で実現するという当初の計画ではなかった成果も得られている。

a) GaInN 結晶成長技術の確立

In 組成 0.4 を超える高品質 GaInN の作製技術を確立した。また、GaN 基板上にダブルヘテロ (DH) 構造広帯域 AlGaInN 太陽電池を試作し、波長約 400nm において内部量子効率 90%以上を実現した。AM1.5 のソーラーシミュレータ ($155\text{mW}/\text{cm}^2$) を用いた評価によって、変換効率 1.4%という世界最高レベルの AlGaInN 太陽電池を実現した。

b) p 型 GaInN 導電性制御技術

In 組成 0.2-0.4 において、室温での正孔濃度 $>10^{19}/\text{cm}^3$ の p 型 GaInN (世界最高レベル) を実現した。

c) GaInN および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価

蛍光寿命測定装置を使用して GaInN の蛍光寿命の評価を行った。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 3 (0) 、論文 (査読付) : 20 (20) 、研究発表・講演 : 34、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

4) エピタキシャル成長技術 (逆エピ、格子整合型 4 接合) (シャープ)

<H22 中間目標 : 逆積み 3 接合セルで変換効率 33% (非集光時) 、42% (集光時) 。H26 最終目標 : 逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板

上4 接合構造セルで変換効率 35% (非集光時)、45% (集光時) >

逆積み 3 接合セルにおいて、組成勾配バッファ層及び格子不整合系ボトムセルの成長条件最適化を実施した。トップセル/ミドルセル/ボトムセルの電流バランス改善を図った。逆積み 3 接合セルにおいてバッファ層の成長条件の最適化及びサブセルの電流整合を改善した結果、非集光時変換効率においては平成 26 年度最終目標を上回る 35.8%を達成した。(独)産業技術総合研究所による測定値であり、世界最高記録であることが認められた。

<成果発表件数>特許出願(外国):4(1)、論文(査読付):1(0)、研究発表・講演:27、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出席:3

5)MOVPE ナノ構造形成技術(東京大学)

<H22 中間目標: InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.2eV 帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eV のトップセル下で 16mA/cm² を達成する。H26 最終目標: 量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.75eV のトップセル下で I_{sc}=17mA/cm² (バンドギャップは 1.2eV に相当)、1.4eV のセル下で I_{sc}=14mA/cm² (バンドギャップは 1.0eV に相当)を得る。これらのミドルセルを利用した3または4接合セルを製作し、集光時の変換効率 45%を得る。>

InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸の設計を行い、その場観察を活用した MOVPE 技術の開発とあわせて、目標を達成する量子井戸セルの開発に成功した。歪み補償階段ポテンシャル量子井戸により、吸収端を 1.24eV まで長波長化し、目標値である 1.2eV 帯をクリアした。吸収電流に関しては、障壁層を世界最高記録の 5nm まで薄層化し、トンネルによるキャリア輸送の効率化を達成し、GaAs 単セルからの短絡電流増大 3.3mA/cm² を実現した。これは、目標である GaAs 単セルからの短絡電流増大 2mA/cm² を大きく上回る成果である。なお、高効率の量子井戸セルを得るためには、i 層における量子井戸の位置を中心から p 層側に多少ずらすという巧妙な構造が必須であることをシミュレーションと実験の両面から解明し、成果につなげている。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:45、新聞・雑誌等への掲載:11、展示会出席:2

6)高倍集光セル微細加工技術(東京大学)

<H22 中間目標: III-V 化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域(400-1,300nm)の反射率を 0.5%以下にすることで、従来の 2 層 AR コート処理セルに対して、2%の短絡電流の向上を達成する。シャープ(株)が供給する III-V 化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ(株)で配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。H26 最終目標: 多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ(株)と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5,000 倍集光下で変換効率 40%を達成する。>

TiO₂/Al₂O₃ の 2 層誘電膜に対して、電子線リソグラフィとドライエッチングにより 400nm ピッチ程度でナノ凹凸構造を形成し、500-1,100nm における広波長域において反射率の低減を達成した。これは、目標である 400-1,300nm における低反射率化をほぼ達成したものと見える。本構造の特徴を維持しつつ低コストかつ大面積展開が可能な手法として TiO₂/Al₂O₃ の 2 層誘電膜上に SiO₂ ナノ粒子を自己組織化配列する手法を開発し、GaAs 単セルの短絡電流を 3%向上させた。これは、目標である短絡電流の 2%増大を上回る成果である。III-V 多接合セルのマイクロ集積化に関しては、シャープ(株)の提供する多接合セルのドライエッチングによる素子分離に取り組んでおり、平成 22 年度末に表面再結合電流などの性能評価を完了できる見込みである。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:5、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

7)次世代プロセス技術開発(InGaN 多接合セル)(東京大学)

<H22 中間目標: In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.12° 以下の結晶性を持つ InGaN を実現する。In 組成 0.3 でホール濃度 5×10¹⁷/cm³ 以上の p 型 InGaN を作製する。H26 最終目標: バンドギャップ 2eV 以下の InGaN 単接合セルを作製し変換効率 7%を達成する。>

In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.06° (世界最高品質)の結晶性を持つ InGaN を実現。In 組成 0.3 でホール濃度 6×10¹⁷/cm³ の p 型 InGaN を実現。スパッタ法による世界初の III-V 族 LED、太陽電池の作製。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):17(17)、研究発表・講演:30、

新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

8) 水素 MBE 法 (GaInNAs:Sb/量子ナノ構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : GaInNAs:Sb 薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術 (水素 MBE 法) を開発し、単接合セルで、非集光時変換効率 15%を達成する。3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs 系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収により $I_{sc}=2\text{mA}/\text{cm}^2$ の増大を達成する (1.75eV のトップセル下で $16\text{mA}/\text{cm}^2$ に相当)。H26 最終目標 : シャープ(株)と協力して 4 接合セルを製作して、集光時の変換効率 45%を達成する。シャープ(株)と協力して 3 接合セルを製作して、集光時の変換効率 42%を達成する。>

水素 MBE 法による GaInNAs:Sb 薄膜成長の高品質化を行った。pin 構造単接合セルの試作を行い、GaInNAs:Sb 層の長波長域 ($\lambda=900\text{--}1,000\text{nm}$) の量子効率として、最大約 80% (世界トップデータ) を達成した。また i 層膜厚=0.6mm のとき、GaAs フィルター下での GaInNAs:Sb 層のみからの短絡電流の寄与は、 $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$ であり、4 接合セルの電流整合の最適条件となる $14\text{mA}/\text{cm}^2$ に近づけることができた。3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs/GaNAs 歪み補償積層量子ドットを挿入し、長波長域の吸収を増大させることを試みた。10 層積層させた量子ドット太陽電池において、量子ドット層が無い従来型の GaAs ホモ接合太陽電池と比較して、短絡電流は $2.24\text{mA}/\text{cm}^2$ 増大し (世界トップデータ)、当初の目標 ($2.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 増) をクリアした。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 23、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) MOVPE 法 (GaInNAs/量子井戸構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : GaInNAs (N:1-5%) 薄膜・量子井戸構造において、X 線半値幅 0.1° 以下および、PL 半値幅 25meV 以下@10K を達成する。H26 最終目標 : GaInNAs 薄膜では、シャープ(株)と協力して 4 接合セルにおいて、集光時の変換効率 45%を達成する。GaInNAs 量子井戸構造では、シャープ(株)と協力して 3 接合セルにおいて、集光時の変換効率 42%を達成する。>

N 濃度 3.1%までの GaAs 基板上 GaInNAs 薄膜、単一量子井戸 (SQW)、多重量子井戸 (MQW) 構造を MOVPE 法により作製し、RTA 処理による効果を検討した。界面平坦性を維持しつつ、フォトルミネッセンス (PL) 発光効率の増大や、キャリアの局在状態の減少等、高 N 濃度 GaInNAs 薄膜・量子井戸構造を高品質化・均質化する RTA 処理技術を確認した。Ge 基板上 GaInNAs の MOVPE 成長技術の開発においては、低温成長した薄い GaAs バッファ層を介し、結晶成長条件を最適化することにより、Ge 基板に格子整合した GaInNAs 薄膜の作製に成功した。また、2 段階 GaAs バッファ成長技術を導入することにより、X 線半値幅 ($2\theta/\omega$) を 0.09° から 0.06° へ、PL 半値幅@10K においては 134meV から 34meV へと狭線化に成功し、大幅な高品質・均質化を実現した。

<成果発表件数> 「8) 水素 MBE 法」に記載の件数を含む

10) エピタキシャル成長技術開発 (量子構造挿入型、格子整合型 4 接合) (シャープ)

<H22 中間目標/H26 最終目標 : 「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に同じ。>

「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に同じ。

11) 高倍集光セルの開発 (シャープ)

<H22 中間目標 : 集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。H26 最終目標 : 光学系一体化モジュールにおいて 5,000 倍集光時変換効率 40%を達成する。>

逆積み 3 接合セルの集光特性を向上するために、トンネルピーク電流の向上、コンタクト層と電極の接触抵抗の低減、シート抵抗低減のための検討を行った。トンネル接合構造の改良を行い、1,000 倍集光動作時に必要な $15\text{A}/\text{cm}^2$ を上回る $56\text{A}/\text{cm}^2$ のトンネルピーク電流密度と $4\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 程度の低抵抗を実現した。コンタクト層と電極の接触抵抗は $4 \times 10^{-4} \Omega/\text{cm}^2$ 程度、表面シート抵抗については約 $600 \Omega/\text{sq}$ を達成したが、500 倍集光が可能なレベルであり更に改善が必要である。集光セル特性としては 230 倍集光時に 42.1% (自社測定値) が得られ、平成 22 年度目標をクリアした。

<成果発表件数> 「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に記載の件数を含む

12) 量子ドット超格子型 (東京大学)

<H22 中間目標: サイズ揺らぎ 10%、中間層膜厚 10nm 以下の量子ドット超格子 (中間バンド) 型太陽電池を作製し、2 光子吸収過程の検証とセル変換効率 12%を達成する。H26 最終目標: 量子ドット超格子 (中間バンド) の製造技術を確立し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時の変換効率 15%を達成する。量子ナノ構造 (中間バンド型) タイプの太陽電池が変換効率 40%越えを実現する設計技術を確立する。>

InAs/GaNAs 系歪み補償構造の最適化を行い、100 層以上の多重積層化、および量子ドットサイズ揺らぎ 10%を達成した。このときの中間層膜厚は 20nm で、現在、ミニバンドの形成が見込まれる 10nm 以下を目指して改善を進めている。また、50 層積層量子ドット超格子型セルを作製し GaAs ホモ接合太陽電池と比較した結果、短絡電流は増大し $26.1\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成した。変換効率は 16.1% (世界最高) が得られ、当初目標の 10%以上を達成した。現在、2 段階光吸収の検証を行っているが、より詳細に調べるためには時間分解測定が必要であるため、測定装置を現在構築中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 14 (14) 、研究発表・講演 : 81、新聞・雑誌等への掲載 : 11、展示会出展 : 2

13) 量子ドット超格子型 (自己組織化量子ドットの積層化) (電気通信大学)

<H22 中間目標: 光吸収波長帯 (1,000-1,300nm) を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を 20meV 以下に抑制し、かつ量子ドット密度を $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 以上に高密度化するための成長技術を開発するとともに、量子ドット構造の 10 層以上の多重積層化技術を開発する。H26 最終目標: 量子ドットの多重積層構造における不均一幅を 25meV 以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において 15%以上の変換効率を達成する。>

a) サーファクタント原子の導入による高密度量子ドット構造の開発

Sb サーファクタント効果の導入法により、InAs 量子ドット成長における $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 以上の高密度化の成長条件を確立した。さらに自己形成 GaAs ナノホール・スペーサー層を導入した近接 2 重積層 InAs 量子ドット構造において Sb 導入法を適用し、 $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 以上の高密度化の成長条件を確立した。InAs ドット成長の初期過程において見出したライブニング効果 (ドット密度の減少、ドットサイズの均一化) を考慮した新たな成長手法を考案し、 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ のドット密度で、発光半値幅 28meV を達成した。Sb 導入法においてライブニング効果を考慮した精密な成長制御により、量子ドット密度 $4 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ の超高密度化を実現した。超高密度 InAs 量子ドット構造の発光特性を調べ、面内量子ドット超格子構造の可能性を示唆した。これにより、面内量子ドット超格子構造を導入した中間バンド型太陽電池の試作、原理検証実験への展開が見込まれる。

b) 自己形成ナノホール埋め込み層を用いた高均一量子ドット構造の開発

自己形成ナノホール層を介した近接 2 重積層構造において、発光半値幅 19meV を達成した。これにより、中間目標である不均一幅 20meV 以下で、かつドット密度 $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 以上の高密度・高均一量子ドットの自己形成技術の開発を達成した。Sb 導入法による高密度量子ドットの自己形成において、量子ドット成長後の成長中断中に Sb 照射を施す手法を提案し、量子ドットの高品質化に有効であることをその場 X 線回折測定により明らかにした。

c) 歪補償層を導入した高密度・高均一ドットの超格子構造の開発

面内量子ドット超格子層上に歪緩和 GaAsSb 埋め込み層を導入することにより、5-11ns のキャリアの長寿命化を達成した。これは太陽電池の高効率化に向けた重要な結果である。近接多重積層成長による量子ドットの縦型超格子化の実現に向けた GaNAs 歪補償層の成長条件について検討を進めており、GaNAs スペーサー層を導入した多重積層成長を検討中である。

d) 面内量子ドット超格子構造の作製とその多重化技術の開発

面内量子ドット超格子層の多重積層成長の成長条件について検討し、GaAsSb 層 6nm+GaAs 層 44nm のスペーサー層において良質な 5 重積層構造を作製した。この 5 重積層構造における量子ドット総密度は $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ に達し、従来の量子ドット構造の約 50-100 層の積層構造に相当する超高密度構造である。現在、中間目標にある 10 層積層化を検討中である。面内量子ドット超格子層を導入した中間バンド型太陽電池の試作を進めており、分光量子効率スペクトルおよび太陽電池特性の評価解析を検討中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 43、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

14) 量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型（新日本石油）

＜H22 中間目標：1.8-2.0eV のバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ 1.0eV 程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに 2 光子吸収の実証を行う。H26 最終目標：量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率 10%を達成する＞

中間バンド形成に必要な構造要件（有機半導体材料内において、nm レベルで量子ドットを近接させる）を満たす材料の探索を行った結果、有機半導体材料でこの要件に適合し光電変換性能の高い材料がなく、中間バンド構造の形成は困難であることが分かった。そこで、中間バンド型と同程度の高効率が期待でき、必要な構造要件が少なく、より簡便に作製できる可能性がある多励起子生成（MEG）型の検討にシフトした。溶液に分散した PbS 量子ドットから MEG に起因するシグナルを確認した。PbS とハイブリッド化する材料として、エネルギー準位や材料の透明性の観点から適切な電子輸送材や、ホール輸送材を選定した。電子輸送材、PbS、ホール輸送材のハイブリッド化手法を検討し、その過程で使用する材料を選定した。中間目標である、「量子ドットからなる光吸収層での効果実証」に関しては、上記選定した材料の組合せで、MEG 効果の確認を実施予定。

＜成果発表件数＞「19)ETA 構造による新概念素子」に記載の件数に含む

15) 光マネジメント（金属ナノ粒子）（東京大学）

＜H22 中間目標：金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5-2.5eV 帯における光吸収係数が 10%増強することを実証する。H26 最終目標：金属ナノ構造を太陽電池に作りこみ、吸収係数の増加が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。＞

直径 15nm、高さ 50nm の銀ナノ粒子を周期 20nm で配置した金属ナノ粒子配列について、本系を太陽電池表面に配置した際に生じる太陽電池層による光吸収増大効果を、FDTD 数値計算により検証した。これまでの知見とは異なり、金属ナノ粒子-太陽電池基板間の電磁気相互作用に近接場効果は見られなかった。しかし、金属ナノ粒子配列を均質な有効媒質として記述することで、FDTD 数値計算を良好に再現できた。金属ナノ粒子配列の有効誘電率は、ナノ粒子の局在プラズモン共鳴周波数を境に大きく変化した。共鳴周波数よりも低エネルギー側では、ナノ粒子配列は高誘電率薄膜とみなすことができ、太陽電池上で反射防止膜として機能した。本計算においては、適切な構造を用いることで、特定の波長における基板表面における反射を 90%以上抑制できることを示した。一方で、共鳴周波数よりも高エネルギー側において薄膜は負の誘電率を示し、太陽電池基板の光吸収を抑制する方向に作用した。以上の計算結果は、これまで近接場による効果とされてきた過去の文献による報告ともよく一致した。

＜成果発表件数＞「12)量子ドット超格子型」に記載の件数に含む

16) 界面電荷移動遷移型セル（東京大学）

＜H22 中間目標：界面電荷移動遷移を利用して、1eV 帯領域で光電変換を達成する。H26 最終目標：界面電荷移動遷移型セルで変換効率 10%を達成する。＞

ナフタレン環を含むジシアノメチレン化合物と酸化チタンナノ多孔体中の酸化チタン表面で合成した界面錯体を用いた界面電荷移動遷移型セルにおいて、1 μ m 付近で光電変換を達成。その他にも、1eV 帯での高効率光電変換に向けた幾つかの成果を得た。ジシアノメチレン化合物にドナー性置換基を導入すると長波長領域の光電変換が高効率化できることを見出した。また、共吸着剤（デオキシコール酸）をジシアノメチレン溶液に適量添加すると、変換効率が向上（80%以上@470nm）することなども明らかにした。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：1（1）、論文（査読付）：5（3）、研究発表・講演：43、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出席：0

17) 新概念素子用ハイブリッド光電素材（東京大学）

＜H22 中間目標：電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池（ETA）において、新日本石油（株）に協力して、1.4eV 帯および 1.0eV 帯での ETA 構造素子を試作し光電変換を検証する。H26 最終目標：新日本石油（株）に協力して、ETA 構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。＞

近赤領域で光電変換するハイブリッド材料の開発を行ってきた。その結果、分子自己組織化体と酸化チタンナノ粒子とのハイブリッド構造の中で、分子自己組織化体の励起子生成に対応する吸収を用いて、約 900nm(約 1.4eV) で光電変換が可能な素材を見出した。有機分子の酸化チタンナノ粒子

への吸着条件などの検討を行い、ハイブリッド素材の高性能化に向けた指針を得た。近赤外領域で強い吸収を示す PbS などの無機化合物半導体量子ドットが、ハイブリッド光電素材として適用可能であることを明らかにした。量子ドットの粒子径を調整することで、1eV での光吸収を発現させることが可能であることも確認している。現状では、750nm に吸収ピークを持つ PbS 量子ドットと酸化チタンのハイブリッド素材を用いることで、1,000nm(1.2eV)における光電変換を達成している。

<成果発表件数> 「16) 界面電荷移動遷移型セル」に記載の件数を含む

18) 多結晶化合物多接合太陽電池 (大阪大学)

<H22 中間目標> トップセル用のバンドギャップ 1.8-2.2eV の太陽電池材料を開発し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生時の平均光量子収率 50%以上 (溶液との接合による評価) を達成して、擬似太陽光照射に対する変換効率 3%以上を達成する。H26 最終目標: 0.6-1.2eV 領域のボトムセル、及びトップセルと連結したタンデム型太陽電池を開発し、変換効率 15%以上を達成する。

a) 化合物半導体の研究開発

トップセル用のバンドギャップ 1.8-2.2eV の太陽電池材料の開発においては、塗布法 (おもにスプレー熱分解法) によるカルコパイライト薄膜 (CuInS_2) の組成制御に取り組んだ。これまでに、 CuInS_2 の Cu、In を Ag や Zn で部分置換した薄膜により、2.06eV までバンドギャップを広げること成功している。

b) 多結晶多接合太陽電池の研究開発

電気化学法による CuInS_2 薄膜の堆積技術をほぼ確立し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生時の平均光量子収率 50%以上を達成した。電気化学法により作製した CuInS_2 薄膜において、擬似太陽光照射に対する変換効率として約 7%を実現した。これは、非真空プロセスによる同様の太陽電池としては世界最高レベルである。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会展出 : 0

19) ETA 構造による新概念素子 (新日本石油)

<H22 中間目標> ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池 (ETA) において、1.0eV 帯および 1.4eV 帯での ETA 構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。H26 最終目標: ETA 構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。

ドナー/アクセプターの相分離構造評価手法としてモルフォロジー評価および移動度評価の手法を確立した。ETA 構造に利用可能な各種色素のイオン化ポテンシャル測定を行い、P3HT/PCBM 系に適合するエネルギーレベルを有する色素を選定した。選定した色素を用いて P3HT/色素/PCBM の ETA 構造素子の試作を行い、光電変換特性を評価し、近赤外域での光電変換を確認した。中間目標の 1.0eV 帯および 1.4eV 帯での光電変換特性を平成 22 年度中に確認予定。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会展出 : 0

20) 金属ナノ粒子/光マネジメント材料 (新日本石油)

<H22 中間目標> 金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA 構造素子 (又は他の光電変換素子) へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果による量子収率が 10%増大することを実証する。H26 最終目標: ETA 構造による新概念素子に光マネジメントを適用し、変換効率 10%を達成する。>

アノード酸化条件とナノホールアレイの形成状態の相関を調べ、ナノホールアレイテンプレート法を用いた金属ナノ粒子サイズおよび分布の制御手法を確立した。本手法で形成した金属ナノ粒子アレイを既存ドナー/アクセプター2成分系太陽電池へ組み込み、量子収率向上効果を確認中。

<成果発表件数> 「19)ETA 構造による新概念素子」に記載の件数を含む

21) 金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発 (東京大学)

<H22 中間目標> 光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。H26 最終目標: 金属ナノ粒子吸収型セルで 10%達成する。>

光電変換を実証し、加えて、波長 900nm(1.4eV)まで光電変換に利用できることを示した。光励起された金ナノ粒子から酸化チタンへの電子移動を直接明らかにし、機構の一部を解明した。電荷分

離への局在電場の寄与を明らかにするとともに粒子の単分散性を高めて効率を向上するため、ナノスフィアリソグラフィ (NSL) 法による粒子アレイ作製法を導入した。また、効率向上のため、金属ナノ粒子の増強電場による色素増感系の光電流増強を測定する系を確立した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

22) ナローバンドギャップ太陽電池 (兵庫県立大学)

<H22 中間目標 : ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eV および 0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。H26 最終目標 : ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15% を達成する。>

化学的手法により合成した硫黄・セレン系ナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行った。さらにそのナローバンドギャップ半導体膜を使用して太陽電池セルの開発を行い、その光電流・電圧の発生に成功した。得られた膜のバンドギャップが 0.98eV となり、「0.9-1.0eV のバンドギャップを有する硫黄・セレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標を達成した。また材料によっては、25mA/cm² もの大きな光電流を発現するものも開発された (現在特許申請処理中)。さらに、ドーピングおよび材料の試行を繰り返し、ナローバンドギャップ材料となる半導体膜の新材料創製に成功し、それを使用した太陽電池を作製し、光電流・電圧の発生に成功した (現在特許申請処理中)。そのナローバンドギャップ材料は 0.5eV となり、「0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標からは、ほんの僅かにナローバンド側にずれた結果となったが、この枠においてはローバンドギャップ化の方が難しく、ワイドバンドギャップ化は容易なため、現在そのワイドバンドギャップ化の研究を進めている (0.5eV⇒0.6eV)。ゆえに、中間目標はほぼ達成できたと考えられ、中間評価に向けての達成度は 90% と考えられる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

【平成 23~24 年度】 (第 2 回中間評価時)

1) 多接合太陽電池の評価解析 (豊田工業大学)

<H24 中間目標 : シャープ (株) と協力し変換効率 45% (集光時) 、H26 最終目標 : GaInNAs 結晶成長技術及びシャープ (株) と協力して、集光時の変換効率 45% (3 接合セル) 、48% (4 接合セル) >

格子不整合系 1.7eV/1.2eV/0.67eV の 3 接合セルの高効率化の為、格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法による転位挙動解析を行った。格子不整合太陽電池では、転位密度の低減 (10⁵/cm² 以下) が大きな課題であり、これまで様々な構造のバッファ層の提案が試みられてきた。その一つのアプローチとして、オーバーシュートイング (OS) 層と呼ばれる高 In 組成の In_xGa_{1-x}As 層を挿入した傾斜組成バッファ層が転位密度の低減に有効であるとされてきた。しかし、OS 層の挿入による格子歪の緩和効果や太陽電池層に与える影響は不明である。そこで大型放射光施設 (SPring-8、BL11XU) の結晶成長その場 X 線回折装置を用いることで、OS 層の歪緩和の様子を世界で初めてリアルタイム観測し、太陽電池層に与える影響を検討した。その結果、OS 層の膜厚を変化させることで太陽電池層を想定したトップ層の歪を圧縮から引張まで制御できることが明らかとなった。転位密度の低減に有効なバッファ層の構造設計に、本手法が有効に活用できることが示された。現在、シャープ (株) と連携し、4 接合化に向けたバッファ層の歪緩和過程の解析を検討中である。今後、シャープ (株) との連携をさらに強化することで、中間目標および最終目標の達成に寄与する。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 12、展示会出展 : 0

2) 多接合太陽電池集光動作解析 (豊田工業大学、再委託 : 宮崎大学)

<H24 中間目標/H26 最終目標 : 「1) 多接合太陽電池の評価解析」に同じ。>

本研究開発では、照射光の分布を 3 次元 (3D) 的に考慮することができる 3D 多接合型太陽電池等価回路を開発した。このモデルを用いて計算した多接合型太陽電池の集光時動作特性が実測値と一致することを確認し、本研究開発により導出されたパラメータおよびモデルが適当であることが示された。このモデルを用い、太陽電池セル内部抵抗における消費電力の解析を行った。光がセル中央に集中した場合、電極およびトップ層の抵抗成分では大きな消費電力 (発熱) が局所的に現れた。ミドル層およびボトム層での消費電力は電極およびトップ層での消費電力より小さく、リング状を

示した。局所的な消費電力は、各サブセルで発生する光起電流がセル中央部に集中し、さらに色収差の影響により電流マッチングが崩れたことが原因である。各サブセルの電流ミスマッチは、ミドル層およびボトム層での消費電力の増加の原因となった。また、局所的な電力消費は、局所的な発熱を発生させるため、改善が必要となる。さまざまな条件（入射光強度、外気温度、放熱条件）において、太陽電池セルの動作温度の上昇について測定を行った。これらの測定結果からセルでの熱収支の解析を行った。これにより、セル内部での局所的な発熱および熱収支を用いて、高集光倍率において温度上昇の少ない構造の最適化に寄与することが可能となる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：9（9）、研究発表・講演：34、新聞・雑誌等への掲載：23、展示会出席：0

3) 多接合セル開発（格子不整合系）（シャープ）

<H24 中間目標：逆積み 3 接合セルで変換効率 36%（非集光時）、45%（集光時）。H26 最終目標：逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板上 4 接合構造セルで変換効率 38%（非集光時）、効率 48%（集光時）を達成する。>

逆積み 3 接合セルにおいて、トンネル接合抵抗の低減、反射防止膜の最適化により、非集光時変換効率 37.5%（AIST 測定）を達成し、平成 21 年度に達成した世界記録 35.8%を更新した。また、トンネル接合抵抗の低減に加え、受光面の電極間隔の最適化により、世界タイ記録となる集光時変換効率 43.5%（300-500suns）を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：4、展示会出席：1

4) 多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）（シャープ）

<H24 中間目標/H26 最終目標：「3) 多接合セル開発（格子不整合系）」に同じ。>

量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成するための Ge セル基板を成長し、東京大学と豊田工業大学へ提供した。

<成果発表件数>「3) 多接合セル開発（格子不整合系）」に記載の件数を含む

5) 量子井戸ミドルセル（東京大学）

<H24 中間目標：GaAs 基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率 20%を得る。項目 4)、8) と連携して、3 接合セルの GaAs ミドルセルに InGaAs/GaAsP 量子井戸を挿入し、トップセル(1.7eV)配置化で短絡電流 $16\text{mA}/\text{cm}^2$ (1sun) を達成する。H26 最終目標：InGaAs/GaAsP 量子井戸挿入 3 接合セルの開発において、項目 4)、8) と連携して、変換効率 36% (1sun)、45% (1,000suns) を達成する。>

InGaAs/GaAsP 量子井戸について、in situ ウェハ曲率モニタリングを活用した正確な歪み補償、高歪み InGaAs/GaAsP ヘテロ界面への原子層レベルの傾斜組成層挿入、さらに歪み由来の In 表面偏析や界面 As/P 組成の非急峻性を抑制するためのガス切り替えシーケンスの構築により、結晶欠陥がきわめて少なく、原子層レベルで界面組成が精密制御された量子井戸を MOVPE により多数積層する技術を確認した。この技術を用い、有効バンドギャップを電流整合 3 接合のミドルセルに適した 1.2 eV へと狭窄化しつつ、井戸の積層数 100 以上を結晶品位の劣化を伴わずに実現した。このような高品位の量子井戸を用い、各種条件下での光電流測定、および時間分解フォトルミネッセンス測定に基づく量子井戸からのキャリア取り出しダイナミクス解析の結果、以下の知見を得た。

○歪み補償の制約のなかでは、障壁を低く（GaAsP の P 組成を小さく）厚くしたほうがキャリア取り出し速度が大きい。

○しかし、障壁厚さ 10 nm 以上の量子井戸は、50 層以上積層すると動作点の順バイアス条件下でキャリア取り出し効率が著しく悪化する。

○したがって、電流増大を得るための量子井戸の十分な光吸収と、高効率の量子井戸からのキャリア取り出しを両立できる構造設計は大変困難である。

以上のことから、開放電圧および曲線因子を良好に保ちつつ電流増大を図るためには、障壁層の厚さを 3 nm 以下に抑えてトンネル輸送によるキャリア取り出しを活用するべきであるという指針を導いた。そこで、InGaAs5nm、GaAsP3nm の 110 層積層超格子を GaAs 単セルに実装した。従来も同様な試みが行われていたと思われるが、本研究開発で開発した InGaAs/GaAsP ヘテロ界面処理技術があつて初めて、結晶欠陥が少なく非発光再結合を抑制した超格子の作製が可能になった。超格子挿入セルは、短絡電流の増分 $3.0\text{mA}/\text{cm}^2$ (InGaAs キャップ下で短絡電流 $16\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上に相当) を達成しつ

つ開放電圧の低下を 0.02V にとどめることに成功した。また、量子井戸周囲の GaAs 層構造を最適化し反射防止コーティングを施した結果、量子井戸を挿入した GaAs 単セルの変換効率 25%を達成した。このような良好な特性を示す超格子挿入セルの集光下での光電変換特性を検証した。量子構造の挿入によりもっとも影響を受けるのは開放電圧であるので、まずは開放電圧の集光による増大を観察した。参照とする GaAs 単セルは理論通り集光に伴い開放電圧が増大したが、超格子挿入セルでは、開放電位の集光に伴う増大が GaAs 単セルに比べて急峻であった。その結果、200 倍程度の集光で超格子セルは GaAs 単セルとほぼ等しい開放電圧 1.1V を示した。量子井戸挿入セルの最大の欠点とみなされている開放電位の参照セルに対する低下は、超格子を高倍集光下で動作させた場合ほとんど無視できる。すなわち、バンド端を長波長側に拡張した結果である電流増大の恩恵は最大限活用しつつ、GaAs 単セルと同等の開放電位を得ることができるため、超格子挿入は多接合セルの高効率化にはきわめて有効であるという見通しが得られた。これは、バルク材料である GaInNAs にはない特長であるといえる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：16（16）、研究発表・講演：52、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出展：0

6) GaInNAs ミドルセル（CBE）（豊田工業大学）

<H24 中間目標：GaInNAs 単接合セルにおいて、変換効率 15%（非集光）、変換効率 18%（集光時）。H26 最終目標：シャープ(株)と協力し AlInGaP/InGaAs/GaInNAs(1eV)/（Ge または InGaAs）4 接合セルにおいて、変換効率 38%（非集光）、変換効率 48%（1,000 倍集光時）>

a) GaInNAs 材料の欠陥制御と高品質化

Ga(In)NAs 材料の実用化に向けた最大の課題は、N 混入に伴い N 起因の複合欠陥が導入され、キャリア移動度、キャリア寿命が低下することである。これまでに、電気的特性を劣化させる欠陥として、大きな捕獲断面積を持った再結合中心（E1）を確認しており、E1 再結合中心密度と、ケミカル・ビーム・エピタキシー（CBE）法での成膜条件、アニール条件との関係を検討した。その結果、E1 再結合中心密度の低減には、Ga 原料に対して、十分な量の As 原料を供給する必要があることが分かり、高 As 原料流量下では、N 濃度を増加しても少数キャリア寿命が低下しないことが示された。原料流量の最適化により、窒素濃度 0.85%の GaAsN 膜で 0.9ns のキャリア寿命を達成した。

b) GaInNAs 単接合セルの開発評価と多接合セルの試作

Si ドープ n 型 GaAsN とアンドープ p 型 GaAsN とのホモ接合で単接合セルを試作した。変換効率は 7.2%（Suns-Voc による測定では 13.7%（AP size））を達成し、平成 22 年度達成の 4.3%から大きく改善した。Suns-Voc は、直列抵抗損失を無視して太陽電池特性を測定できる手法であり、この測定で効率が大きく向上していることは、電極形成などのセル作製プロセスに主な問題があることを示すものである。これまでに達成した GaAsN 材料の品質（移動度 $\mu = 200 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、少数キャリア寿命 $\tau = 0.9 \text{ns}$ ）から、理想的な構造で得られる太陽電池特性を計算すると、変換効率 16.5%、さらに高品質化（ $\mu = 470 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）をはかれば 21.0%が期待できる。したがって、セル作製プロセスとセル構造の最適化により、変換効率 15%以上の中間目標の達成が見込める。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：8（8）、研究発表・講演：42、新聞・雑誌等への掲載：11、展示会出展：0

7) 窒素系結晶成長の理論解析（豊田工業大学、再委託：九州大学）

<H24 中間目標/H26 最終目標：「6) GaInNAs ミドルセル（CBE）」に同じ。>

(In)GaAsN 結晶中への点欠陥の導入が電子（正孔）の散乱を引き起こし、キャリア寿命/変換効率の低下を招くことが知られている。本研究開発では結晶の成長過程で混入する不純物（特に水素）に着目し、その混入機構の解明および混入を抑制するための成長指針の提案を行った。原子レベルでの理論解析により、実験条件の範囲内では GaAs[001]-c4x4 表面再構成構造が安定であること、表面 N 原子は H を伴って安定化することを解明した。すなわち、N 原子の結晶中への取り込み過程で H 不純物も同時に混入されやすいことが示唆された。これを回避する方法として、成長速度を遅くし、成長過程における H 掃き出しプロセスの時間を十分に確保する方法が提案される。この提案・指針に基づき豊田工業大学において検証実験を行ったところ、キャリア寿命の向上（ $\tau > 1 \sim \text{ns}$ ）が成果として確認された。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：2（2）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

8) GaInNAs ミドルセル (水素 MBE、MOVPE、量子ドット添加) (東京大学)

<H24 中間目標 : GaInNAs:Sb 薄膜 (水素 MBE 法)、GaInNAs 薄膜 (MOVPE 法) の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術、単接合セルで変換効率 15% (1sun)、GaAs ミドルセル配置下で電流 14mA/cm² (1sun)、及び 4 接合セルの第 3・4 セルにあたる GaInNAs:Sb/Ge2 接合セルにおいて、電流 7mA/cm² (1sun) を達成する。また 3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs/GaNAs 系積層量子ドットを挿入し、トップセル (1.7eV) 配置下で電流 16mA/cm² (1sun) を達成する。H26 最終目標 : シャープ(株)と共同で、GaInNAs 薄膜を第 3 セルとした 4 接合セルの開発において、効率 39% (1sun)、48% (1,000 倍集光)、量子ドット添加 3 接合セルの開発において、変換効率 36% (1sun)、45% (1,000 倍集光) を達成する。>

本研究開発では、GaInNAs:Sb の製膜条件 (水素 MBE) 及びセル構造の最適化を行い、GaAs ミドルセル配置下で、9.6mA/cm² (1sun) を達成した。単接合 GaInNAs:Sb セルの効率は 8.6%、最終目標の 15%は達成できる見込みである。次に GaInNAs:Sb/Ge2 接合セルの試作に着手した。Ge ボトムセルはシャープ(株)の提供による。試作セルにおいて短絡電流 10.9mA/cm² が得られ、4 接合タンデムセルで必要とされる 14mA/cm² に近づけることができた。一方、InAs/GaNAs 系積層量子ドット挿入型のタンデムセル開発では、50 層積層させた量子ドットセルにおいて、トップセル (1.7eV) 配置下で短絡電流 15.2mA/cm² (1sun) を達成した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) 広帯域 AlInGaIn 結晶を用いた多接合太陽電池 (名古屋大学、共同実施 : 名城大学)

<H24 中間目標 : 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて変換効率 5%を達成する。H26 最終目標 : 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討を実施し、単接合セルで変換効率 10%以上を達成し、かつ、多接合セル作製のための要素技術を確立する。>

a) InGaIn 結晶成長技術の確立

2 層超格子構造の採用によるミスフィット転位の伝搬抑制と高効率キャリア取り出しを実証し、200 倍集光で変換効率 4%を達成した。Si 上の疑似多接合型で 5.9%の報告はあるが、窒化物単独での効率は世界最高である。また、窒化物の 100 倍を超える集光での高い変換効率は他では実現された例は無く、高結晶欠陥密度の証左である。更に今回の試作では反射防止膜を利用していないため、反射防止膜形成により推定 5%を達成した。r 面サファイア上の a 面利用により、1sun で窒化物では世界最高の短絡電流密度 5mA/cm² を達成した。今後結晶品質の向上により、開放電圧を改善し、本年度中に変換効率 5%以上を目指す。スパッタリングにより形成したバッファ層を用いた Si 基板上の厚膜 InGaIn の低温成長法の確立に成功し、Si 太陽電池との多接合により、理論効率 30%以上を目指すための基盤技術が確立した。

b) p 型 InGaIn 導電性制御技術

In 組成 0.2-0.4 において、室温での正孔濃度 >10¹⁹/cm³ の p 型 GaInN (世界最高レベル) を実現した。更に多接合素子形成の基幹技術であるトンネル接合の成長に成功した。

c) InGaIn および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価

ダブルヘテロ構造の採用により、デバイス設計の自由度が増し、少数キャリア拡散長の影響低減が可能であることが分かった。一方窒化物では圧電性の影響が大きく、結晶面やドーピングプロファイルに工夫が必要であることを明らかにし、実際に結晶面を圧電効果の大きい c 面から変えることにより高効率化が可能であることを世界で初めて示した。また、開放電圧及び FF 減少の成因として、貫通転位では無く成長ピットが原因であることを突き止め、成長ピット発生の抑制方法を確立している。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 7 (7)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

10) InGaIn 多接合セル新プロセス (東京大学)

<H24 中間目標 : InGaIn を用いた電界制御型太陽電池構造を提案し、その有効性をスパッタ法による素子作成で実証する。スパッタ法を用いて In 組成 0.3 でキャリア移動度 200cm²/V・s 以上の InGaIn を作製する。H26 最終目標 : バンドギャップ 2eV 以下の InGaIn 単接合セルを作製し変換効率 7%を達成する。>

パルススパッタ法による低温成長を行うことで、全組成領域に亘って InGaIn および InAlN の高品質結晶成長技術を開発した。また、電界制御型太陽電池を試作し、c 面窒化物系太陽電池では最大の

短絡電流密度 4.06 mA/cm^2 を得た。パルススパッタ法における結晶成長プロセスの制御性を向上させる目的で、レーザー光を用いた成長速度および歪みなどの *in situ* 観察技術を開発した。これにより InGa_{0.4}N 結晶の高品質化が実現し、In 組成 0.4 の InGa_{0.4}N 薄膜において世界最大の量子収率や、In 組成 0.3 の InGa_{0.3}N 薄膜において $228 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ という高いキャリア移動度が得られた。また、本技術を用いることでスパッタ法による 3 原色の発光ダイオードや高電子移動度トランジスタの作製が可能となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 8 (8) 、研究発表・講演 : 43、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11) ナローバンドギャップボトムセル (CuTe) (兵庫県立大学)

<H24 中間目標 : ナローバンドギャップ太陽電池用として、 $0.9\text{--}1.0\text{eV}$ および $0.6\text{--}0.7\text{eV}$ のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、印刷型太陽電池で変換効率 8%の低価格太陽電池の実現。H26 最終目標 : ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15%を達成する。>

化学的手法により合成した硫黄・セレン系ナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行った。その結果、 0.97eV ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$) および 0.7eV (AgInTe_2) の半導体材料の作製に成功した。さらにそのナローバンドギャップ半導体膜を使用して太陽電池セルの開発を行い、その光電流・電圧の発生に成功した。 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ においては 4.9%の変換効率の太陽電池となり、印刷プロセス太陽電池としては現在の日本国内最高値を出した (未発表データ)。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (0) 、論文 (査読付) : 6 (6) 、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

12) 近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた 3 接合用ボトムセル構築 (東京大学)

<H24 中間目標 : 太陽電池のボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時に $I_{sc}=12\text{mA/cm}^2$ を得る。H26 最終目標 : 3 接合セル、非集光下で変換効率 30%を達成する。>

ワイドギャップ半導体と化合物半導体量子ドットで作る光電変換層と、光捕集効率の向上を狙いとした金属ナノ粒子で作る光捕集アンテナとを組合せた 3 接合用ボトムセルの研究開発を実施した。ワイドギャップ半導体と化合物半導体量子ドットのみで作製した太陽電池セルで、波長 $1,500\text{nm}$ 付近から短波長での光電変換を達成した。一方、近赤外領域でのプラズモン共鳴による電場増強に向けて、金や銀のナノ粒子を光捕集アンテナとして利用し、局在表面プラズモン共鳴による光電流増強を試みた。その結果、金や銀のナノ粒子によって、波長 $1,200\text{nm}$ 以上での光吸収を達成した。また、光電流増強において、金ナノ粒子と色素との距離は 10nm 程度が最適であることを明らかにしているが、さらに、金ナノ粒子のサイズは 100nm が最適であることを明らかにした。化合物半導体量子ドットと酸化亜鉛ナノ構造の最適化並びに、局在表面プラズモン共鳴効果を組合せ、 $850\text{--}1,400\text{nm}$ の波長領域で IPCE 値を 50%程度に向上させることで、中間目標の達成が見込める。中間目標を満足するボトムセルの研究開発と合わせて、他項目で開発するミドルセルとの接合技術の研究を進めることで、最終目標の達成が期待できる。当面はメカニカルスタック技術の構築により、早期の目標達成を目指す。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

13) 量子ドット超格子セル (東京大学)

<H24 中間目標 : 量子ドットの微小化、また面内密度として $10^{11}/\text{cm}^2$ を有する 50 層積層量子ドット超格子セルの開発を行い、変換効率 25% (低倍集光時) を達成する。H26 最終目標 : 光閉じ込め構造を取り入れたセルにおいて、変換効率 27% (非集光) 、40% ($1,000$ 倍集光) を達成する。>

本研究開発では、量子ドットの微小化と高密度化に向けて水素 MBE 法による製膜技術の最適化を行い、平均直径 24nm 、面内密度 $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ を有する 50 層積層 InAs/GaNAs 歪み補償量子ドット超格子セルを開発した。このセルにおいて、変換効率 20.3% (100 倍集光) を達成した。これはロシア・科学アカデミーの 24.9%に次ぐ世界記録であり、目標の 25%は達成できる見込みである。また、量子ドット (中間バンド) を介した 2 段階光吸収によるセル動作の原理実証が最重要課題であったが、これを室温で観測・実証することに世界で初めて成功した。さらに、量子ドット中でのキャリア再結合寿命を長くするために、InAs/GaAsSb 系の Type II 量子ドットセルの開発を行い、効率 17.3% (1sun) を達成した。本セルにおいても室温で 2 段階光吸収動作を確認することができた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 11 (11) 、研究発表・講演 : 16、新聞・雑誌等への掲載 : 6、展示会出展 : 0

14) 超高密度量子ドットセル (電気通信大学)

<H24 中間目標 : 面内密度 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上を達成し、面内高密度量子ドットの 5 層積層構造を作製した面内高密度型量子ドット超格子セルを作製する。その非集光時変換効率 15% を達成する。H26 最終目標 : 量子ドットマルチバンドセルを作製し、変換効率 27% (1sun) 、40% (1,000suns) を達成する。>

低コスト化に重要な GaAs[001] 基板上に、世界最高の $6 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ の面内超高密度 InAs 量子ドットの自己形成技術を開発した。この面内高密度量子ドット層における発光特性の温度・励起光依存性の解析により、局在した中間バンドの形成について検証した。GaAsSb/InAs 系 Type II 量子ドット構造を作製し、蛍光寿命が 15ns を超える長寿命化を実現した。また量子ドットセルにおける理論電力変換効率のドット密度依存性を計算し、量子ドット密度の目標値を明確にした。面内超高密度量子ドット層を導入した新しい量子ドットセル構造を提案し、試作開発を進めた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0) 、論文(査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

15) マイクロ集積集光セル開発 (東京大学/シャープ)

[東京大学担当]

<H24 中間目標 : 多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を 20% 以下に抑えつつ、マイクロセルの 10 直列動作を達成する。H26 最終目標 : 多接合集積直列セルの集光下動作により、モジュール変換効率 35% を達成する。>

半絶縁基板上に作製した GaAs 単セルに対して微細加工を施し、10mm 角の受光面積を $5 \times 2\text{mm}^2$ のサブセルに分割し、マイクロ集積 10 直列セルを作製した。このとき、素子分離および直列配線の表面被覆率を 17.5% に抑えることに成功した。同時に、バイパスダイオードを各セルに並列に配置し、シャドーによるセルの破壊防止、電力出力低減の最小化に成功した。本デバイス製造プロセス開発の過程で、ドライエッチング条件が最適化され、ドライエッチングが引き起こす開放電圧および曲線因子の悪化を回復するための表面ウエット処理およびアニーリングの条件が得られた。また、素子分離用トレンチに施す表面絶縁処理および配線形成のための平坦化処理がデバイス作製の歩留まり向上に大きく貢献することが判明した。これらの知見をもとに、シャープ(株)が作製した InGaP/GaAs₂ 接合ウエハに対して 10 直列加工を行った。単接合セルに比べて深い素子分離が必要になるため、絶縁膜の形成がより困難になるが、導入した ALD 装置を用いて被覆性の良い絶縁膜を形成できた。現在プロセスの歩留まり向上に取り組んでおり、平成 24 年度中に 10 直列動作を実証できる見込みである。また、500 倍までの集光下における特性評価を行い、配線の直列抵抗による性能劣化をほぼ完全に防止できることを実証する。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0) 、論文(査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

[シャープ担当]

<H24 中間目標 : 薄型で高光学効率を実現する集光モジュールを設計試作し、逆積み 3 接合セルに対して光学効率 90% を達成する。H26 最終目標 : 逆積み 3 接合セルを用いたモジュールで変換効率 35% を達成する。>

15mm 角で高さ 30.8mm の薄型非球面形状単位モジュールを作製し評価。光学効率 89% を確認。また小サイズのセルを加工、直列配線接続し、集積化する技術検討を共同で行うため、東京大学にタンデム構造エピタキシャルウエハを提供した。

<成果発表件数>「3) 多接合セル開発(格子不整合系)」に記載の件数を含む

16) 光閉じ込め微細構造の開発 (東京大学)

<H24 中間目標 : セル表面・裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を 3 倍に増加させ、短絡電流の増大を実証する。H26 最終目標 : 量子マルチバンドセルに光マネジメント技術を適用し、量子ナノ構造層における吸収量を 10 倍に増加させる。これにより、変換効率 27% (非集光) 、40% (1,000 倍集光) の達成に資する。>

量子ドット等ナノ構造による長波長領域の光吸収増大を達成してマルチバンドセル実現および効

率向上に資するため、表面傾斜屈折率構造、裏面乱反射構造を光学理論に基づいて設計し、微細加工技術を駆使した試作により、その効果を実証した。さらに、ミクロンスケールの凹凸構造を有する pn 接合により光の面内伝搬モードを利用した光閉じ込めを検討した。具体的な成果を以下にまとめる。

- 高倍集光モジュールにおけるトータル光マネジメント技術として、中継光学系とセルの表面・界面における反射を最小化する表面傾斜屈折率構造を数値シミュレーションによって決定した。その際、現時点で最適化された中継光学系の構造を模した系によって計算を行いパラメータを決定した。今年度中にその構造を作製する予定である。
- GaAs 吸収端よりも長波長側の量子ナノ構造の吸収に対応する波長について、裏面乱反射によって光閉じ込めを行うための実装の容易な構造を設計した。項目 17) と共同して行った光路追跡計算により、基板を除去してセルを数ミクロンまで薄層化し、セルの裏面に乱反射構造を実装することで、量子ナノ構造の長波長光吸収を約 5 倍まで増強できることが明らかになった。ついで、項目 5) と共同して長波長領域の自由キャリア吸収が少ない半絶縁基板上に表面コンタクト型量子井戸挿入セルを作製し、裏面乱反射構造を実装することによる量子井戸の吸収増大を量子効率の増大として観察できる実験手法を開発した。このような実証用セル裏面にウェットエッチングにより数ミクロンピッチのアレイ状メサを形成し、量子井戸の光吸収に由来する量子効率を 3 倍に増加させることに成功した。さらに、メサ表面に ALD で形成する極薄酸化膜と金属ミラーを積層することで、更なる量子効率増大を達成できる見込みである。
- セル表面に施す光屈曲構造の形成法として、低損傷の中性粒子ビームエッチング技術の適用可能性を実証した。GaAs 表面に通常のドライエッチングを施すとダメージが導入され、表面再結合速度が著しく増加してセルの特性を劣化させる懸念がある。そこで、中性粒子ビームを用いた GaAs 表面のダメージレス加工の可能性を検討した。ダメージの指標として GaAs 表面近傍に形成した量子井戸からのフォトルミネッセンス (PL) を採用し、量子井戸の端から 10nm 程度まで中性粒子ビームエッチングで孔を掘った。通常のドライエッチングであればダメージに由来する非発光緩和により量子井戸からの PL はほとんど観察されないが、中性粒子ビーム加工の場合はエッチングによっても PL 強度はほとんど変化しなかった。これにより、中性粒子ビームエッチングによる表面テクスチャ形成は光マネジメントに大変有用なプロセスであることが明らかになった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

17) 表面修飾技術開発 (ナノ構造修飾) (JX 日鉱日石エネルギー)

<H24 中間目標 : 量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900-1,300nm の領域の光の吸収量が 3 倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実証する。H26 最終目標 : 量子マルチバンドセルに光マネジメント構造を適用することで、量子ナノ構造層における吸収量を 10 倍に増加させる。>

量子マルチバンドセルの裏面に金属ナノ構造を形成した場合の光吸収量増大効果をシミュレーションする手法を確立した。そのシミュレーションにより、金属ナノ構造の径、間隔等の光吸収量増大効果への影響を明らかにすると共に、それらのパラメータを最適化することで、量子井戸セルの吸収量が 4.5 倍になる金属ナノ構造を設計することができた。一方で、量子井戸セルの裏面への金属ナノ構造作製手法の検討を行い、1.4 倍の光吸収量増大効果を実験的に確認した。光吸収増大効果が小さい原因は、基板の吸収が大きいこと、設計通りの金属ナノ構造が作製できていないことであるため、基板吸収を最小化したリフトオフセルの作製手法および最適なナノ構造作製手法の検討を年度内に実施し、それらを組合せることで中間目標を達成する見込み。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 5 (2) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

② 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

【平成 20~22 年度】 (第 1 回中間評価時)

1) 高配向性平面ポリシラン材料の開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10% を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率 12.5% を達成する。>

平成 20 年度には、空気中で安定な架橋ポリシランをトルエンなどの汎用溶媒に溶かした溶液から

基板上に塗布した塗布膜を真空下 400°C以上で加熱するだけで、近赤外光を吸収するポリシラン薄膜を簡便に作製できることを見出した。また、加熱温度と加熱時間をコントロールすることにより、ポリシラン薄膜のバンドギャップを紫外光から近赤外光まで連続的に変化させることができることも分かった。平成 21 年度には、鎖状ポリシラン薄膜に、光照射することにより鎖状ポリシラン同士を架橋させ、その後、真空下で加熱すると平面性が向上して、吸収が長波長側にシフトすることを見出した。さらに、鎖状ポリシランに結合している置換基の種類を、アルキル基、フェニル基、ナフチル基、アンスリル基と変えることにより、加熱後の薄膜のバンドギャップを制御できることも分かった。さらに、平成 22 年度には、加熱処理することにより 1.8eV にバンドギャップが制御された平面ポリシラン薄膜を用いてフラーレンとの積層タイプの太陽電池デバイスを作製した。このデバイスの AM1.5 の擬似太陽光照射下での IV 特性を評価したところ、 $V_{oc}=0.33V$ 、 $J_{sc}=0.15mA/cm^2$ 、 $FF=0.16$ を得た。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 2 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 14、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

2) 配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発 (東京農工大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で変換効率 10%を達成する。その際の特性値としては $FF=0.8$ 、 $V_{oc}=0.7V$ 、 $I_{sc}=18mA$ を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) ナノ結晶シリコン層の形成プロセス技術

任意の厚さの nc-Si 層を均一に形成するプロセス技術を確立した。ナノ構造に適した低温酸化アニール法および乾燥技術を導入した。連続プロセスによってセルフスタンディング膜を基板から剥離する技術を開発し、大面積化も実現した。

b) 粒径制御によるバンドギャップエンジニアリング

フォトルミネセンスと光吸収スペクトル解析により、バンドギャップの拡大および目標範囲 (1.8 eV 以上) での可変性を実証した。また入射光スペクトルに合わせてバンドギャップ分布を制御する基本技術を開発した。

c) 界面のキャリアトラップ低減

ナノ構造表面に高品質のトンネル酸化膜を形成し、界面の欠陥を低減した。また超臨界乾燥の導入により光導電感度を向上できることを見いだした。

d) 太陽電池要素としての評価

基礎となる光導電の測定評価を先行して実施し、想定する波長域での光電材料としての有用性を確認した。また、試作セルで変換効率 3%を得た。引き続き、その向上を追求中である。さらに光キャリア増倍、青色燐光など、光電変換に関する新規現象を見いだした。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (1)、論文(査読付) : 12 (12)、研究発表・講演 : 14、新聞・雑誌等への掲載 : 4、展示会出展 : 3

3) 結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命 100 μs 、ヘテロ界面再結合速度 1,000cm/s を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

分子線エピタキシー (MBE) でシリコンゲルマニウム (SiGe) の形成を行い、膜成長条件と膜の組成、歪の関係を明らかにした。Si 基板上に Ge 組成 60%の SiGe 膜を太陽電池に必要な厚さ 5 μm まで成長可能であることを確認した。SiGe の膜質評価指標として少数キャリア寿命に注目し、その正確な測定に必要な Ge、SiGe の表面不活性化技術を世界で初めて確立した。この手法で作製した膜に適用したところ、膜中の欠陥密度が高いことを反映して、少数キャリア寿命は Ge 組成 10%の膜で 0.9 μs 、Ge 組成 90%の膜で 0.3 μs と低い値であることが判明した。伝導帯側のバンド不連続が小さく、価電子帯側のバンド不連続が大きい、アモルファスシリコン、GaP、InGaP が SiGe とのヘテロ接合形成に適していることを見出し、アモルファスシリコン/SiGe 接合、GaP/SiGe 接合を実際に試作した。ヘテロ界面の再結合速度の評価を予定している。Ge 組成 10%で変換効率は 1.3%と改善の余地が大きい、MBE 法で作製した SiGe 薄膜を用いたヘテロ接合太陽電池をおそらく世界で初めて試作した。なお、このセルではヘテロ接合形成にアモルファスシリコンを使用し、SiGe 膜の厚さは 4.6 μm で

あった。SiGe 薄膜セルでは少数キャリア寿命が短くても（この場合 $0.9\mu s$ ）、ヘテロ接合の採用と適切なセル設計で変換効率の向上が可能であることを、セル試作を通じて確認した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

4) シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：バンドギャップ $0.9eV$ の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ $0.9eV$ の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度 $10^{16}/cm^3$ を目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ $0.9eV$ の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ $0.9eV$ の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度 $10^{15}/cm^3$ を目標とする。>

シラン、水素、テトラメチルスズを原料ガスとして反応容器に導入し、プラズマ CVD 法により SiSn 薄膜 (Sn 濃度 0-30at%) の作製を行った。XRD、ラマン散乱スペクトル測定により作製した SiSn 混晶薄膜の構造解析を行った。また、膜中 Sn 濃度の評価には EDX、XPS スペクトル測定を用いた。その結果、膜中 Sn 濃度 1at%以下のものに関しては、微結晶化した SiSn 薄膜の作製に成功しているが、膜中 Sn 濃度 1at%以上のものに関してはアモルファス状態である事を確認した。透過-反射スペクトル測定より吸収スペクトルを算出し、さらに得られた吸収スペクトルをタウツ-プロットする事により光学バンドギャップの見積もりを行った。その結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い、光学バンドギャップがレッドシフトすることを確認した。さらに、アモルファス状態ではあるが、膜中 Sn 濃度 ~20at%で光学バンドギャップ $0.9 eV$ の SiSn 混晶薄膜の作製に成功した。太陽電池材料としては、光照射時のコンダクティビティーが重要となるため、SiSn 単膜に Al のコプラナー電極を蒸着し、明/暗状態のコンダクティビティーの測定を行った。その結果、Sn 濃度 13at%（光学バンドギャップ ~ $1.2eV$ ）までの光起電流の存在を確認した。上記の実験結果を基に、ヘテロ接合型 SiSn 薄膜太陽電池の作製を開始した。構造は、Asahi U 基板（ガラス基板にテクスチャー付き SnO_2 膜の付いた基板）上に p/i/n 層をプラズマ CVD 法で堆積したスーパーストレート型（Asahi U/p(a-SiC)/i(SiSn)/n(a-Si:P)/裏面電極）である。作製した SiSn 薄膜太陽電池の外部量子効率スペクトルの測定を行った結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い長波長領域の光感度が大幅に上昇することが確認された。さらにこの実験により、外部量子効率スペクトルにおける長波長領域における立ち上がり位置（エネルギー位置）は、タウツ-プロットより求めた光学バンドギャップのエネルギー位置とほぼ等しい事が確認された。今後、デバイス性能を上昇させるため、デバイスにおける条件出しを試みる予定である。なお、高品質な i 層 (SiSn) 薄膜を作製するためには、気相中で発生するラジカル種の挙動を理解し、それらを制御する必要がある。そこで、プラズマ発光スペクトル (OES) の測定による気相診断を行い、気相中で発生するラジカル種と膜質との相関を調べている。しかし、製膜前駆体の特定には至っていない。一方、膜質向上の観点から、ESR による欠陥密度測定に着手した。しかし、膜中の荷電欠陥が原因と見られる ESR 信号強度の大幅な低下が見られ、正確に欠陥密度測定が行えていない。太陽電池デバイスの特性測定においても、i (SiSn) 層内で電界が弱められキャリア収集効率の低下を招いている事を示唆する結果が得られている。今後、荷電欠陥の起源をより詳細に調べ、それを低減できる製膜法を検討する予定である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

5) ガラス基板上的シリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術（コーニング）

<H22 中間目標：シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ $0.9eV$ の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として $10^8/cm^2$ を目標とする。H26 最終目標：シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ $0.9eV$ の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として $10^7/cm^2$ を目標とする。>

バンドギャップ $0.9eV$ に相当する Ge 組成約 0.5 の SiGe 単結晶薄膜を、MBE 法により厚さ約 $3\mu m$ までガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した。反応性熱 CVD 法では厚さ $7\mu m$ の Si 単結晶薄膜成長をガラス上 Si 薄膜基板の上に実現し、Ge 薄膜についても既に成膜実験を開始しているので、目標の SiGe 膜を今年内には成長できることを見込んでいる。さらに、ガラス上 Ge 薄膜基板については加熱温度 $500^\circ C$ まで問題がないことを確認したので、同様に SiGe 単結晶薄膜の成長を行い、今年内にガラス上 Si 薄膜基板との比較および最適化を行う予定である。単接合太陽電池の作製は、

これまで結晶成長条件の把握に時間を要したため未実施であるが、7月には最初の試作および特性評価を行う予定である。Si 単結晶薄膜の転位密度評価として、Dash エッチャントによるエッチピット密度評価法が有効であることを確認した。MBE 法によりガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した SiGe 単結晶薄膜について、Ge 組成 0.3 ではエッチング法で $10^8/\text{cm}^2$ 以下の転位密度を示唆する結果を得たが、Ge 組成 0.5 の試料ではエッチピット観察に成功していないため、TEM による転位密度評価を7月までに予定している。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 3

6) ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開発 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : Si と Ge 単結晶薄膜のヘテロ接合を用いたボトム用単接合太陽電池で変換効率 8% を達成する。その要素技術として Ge 単結晶薄膜のキャリア拡散長として Ge エピタキシャル膜のウェハレベルでの膜厚と同程度(キャリア寿命 $10\mu\text{s}$) を目標とする。H26 最終目標 : ガラス基板上に形成した単結晶 Si 基板上に単結晶 Ge 薄膜を活性層として作製した、ボトムセル用ヘテロ接合型太陽電池で変換効率 10% を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

$\text{Si}_2\text{H}_6\text{-GeF}_4$ 系原料ガスを用いる反応性熱 CVD 法により、Ge[100]基板を用いたホモエピタキシャル成長の条件を検討し、 350°C で表面モルフォロジーに優れたホモエピ膜の作製条件を確立した。Si[100]基板を用いて、平成 21 年度に確立したホモエピタキシャル成長条件を用いて、Si 上の Ge のヘテロエピタキシャル成長条件を検討した。この条件では、結晶性、及び、Ge 組成が低下するという問題点が明らかとなり、ガス流量比、反応圧力、基板温度について再度、検討を進めた。その結果、 300°C 以下 (275°C) の条件において、堆積速度は遅いものの表面モルフォロジーに優れた Ge 組成の高いエピ膜を作製できることを明らかにした。この条件を用いて Si 基板上に Ge を堆積し、太陽電池の試作を行ったが、Ge 膜厚が予想以上に薄く、発電を確認するに至らなかった。この問題を解決するため、見出した Si のヘテロエピタキシャル条件により、Ge のエピタキシャル seed 層を作製し、Ge のホモエピタキシャル成長条件との組み合わせによる Ge 膜の成長の検討の取り組みを開始した。これを用いて、太陽電池の再試作を行う予定である。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

7) フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発 (東北大学)

<H22 中間目標 : 産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 8% を達成する。その要素技術として成長温度 400°C 以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度(ダングリングボンド密度)を $10^{16}/\text{cm}^3$ 台とすることを目標とする。H26 最終目標 : 産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 10% を達成する。その要素技術として成長温度 400°C 以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度(ダングリングボンド密度)を $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下とすることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

平成 20 年度は、中性粒子ビームによる Ge 成長のため、 GeH_4 および GeF_4 供給対応のガス導入系を導入し、既設の中性粒子ビーム装置に接続して、初期的な成膜可能性について検討した。平成 21 年度は、上記水素中性粒子ビームと GeF_4 による Ge 堆積を試み、 GeF_4 の吸着確率の違いから、Ge 成膜速度の基板種類依存性が大きいことがわかった。特に Si や SiO_2 に比べプラスチック基板への成長速度が速いことが分かった。しかし、結晶性の評価では膜は Ge 結晶ではなく GeO_x になっていることが判明した。チャンバーからの酸素放出の抑制や吸着確率の向上のためにパルス変調プロセスを適用して効果が見られた。しかし、このガス系では高速で緻密な成膜は難しいと判断した。平成 22 年度は、更なる高付着率を持つ MO プリカーサを用いてより緻密で高速な成膜を目指して、中性ビームエネルギー、フラックス、プロセス室圧力、基板温度の依存性を評価した。高付着率を持つプリカーサを用いることで、膜中にカーボンの成分が若干残るものの、デポレートは大きく向上した。また、ビームのパルス化、基板温度の極低温化を行うことで、プリカーサの吸着確率および表面反応を促進させ、不純物濃度を低減、高密度な成膜が可能になることを確認した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

8) 擬単結晶固相成長技術の開発 (東海大学)

<H22 中間目標> バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 8% を達成する。その要素技術として、波長 1,000nm で 30%以上の分光感度を目標とする。H26 最終目標: バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、波長 1,000nm で 50%以上の分光感度を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

金属誘起結晶化によるシード層形成では、SiGe シード層形成過程において、Si と Ge の共晶温度 (420°C) 以下のプロセスでは、SiGe の結晶化は起こるものの、1 週間以上時間を要し実用的ではないこと、また 450°Cまで上昇させることで処理時間は 4 時間程度にまで短縮できるが、Ge の分離が著しいことが分かった。現在、430°C程度に SiGe 結晶化と処理時間の両者を両立できる条件を模索中であり、平成 22 年度末までには良質な SiGe シード層の実用的な形成法が得られる見込みである。結晶シリコン基板をシード層とし、擬単結晶 Ge の成長を検討している。電子ビーム蒸着及びスパッタにより擬単結晶を直接製膜する方法と非晶質製膜後の固相成長により結晶化させる方法を夫々比較した結果、直接製膜と固相成長の双方で電子ビームによって製膜した試料から擬単結晶を得ることに成功した。現在、原因について究明中であるが、酸素や水素等の不純物が影響している可能性が高い。この擬単結晶 Ge 膜を用いて現在太陽電池の試作中であり、今年度中に報告の予定である。欠陥処理については、水素プラズマ、高圧水蒸気等の検討を行ったが、Ge 濃度が高い程処理効果は少なく、現状では有効な手法は見つかっていない。今後、水素以外の元素による処理の検討を予定している。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (0) 、論文 (査読付) : 6 (6) 、研究発表・講演 : 21、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9-1) ヘテロ接合デバイス化技術の開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標> バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8%を達成する。H26 最終目標: ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

光電子分光法により、n 型単結晶シリコンとアモルファスシリコンならびに酸素濃度 4at%のアモルファス酸化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットを評価したところ、それぞれ 0.11eV ならびに 0.27eV であった。単結晶シリコンとアモルファス炭化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットは、炭素濃度を 8at%から 15at%に増加させると、0.25eV から 0.36eV に増加した。単結晶シリコンと i 層の価電子帯におけるバンドオフセットの増加につれて、HIT 型ヘテロ接合太陽電池の曲線因子が減少することが明らかになり、太陽電池特性を向上させるためには、バンドオフセットの小さい材料を採用すべきことが示唆された。単結晶ゲルマニウム基板に対してフッ酸洗浄を行うと表面に酸化ゲルマニウム膜が残存し、当該基板を用いた HIT 型ヘテロ接合太陽電池の特性を低下させることが示唆された。単結晶ゲルマニウム基板を過酸化水素中でいったん酸化させ、その後のアニール処理により酸化ゲルマニウムを熱脱離させることで、清浄なゲルマニウム表面が得られることが明らかになった。酸化と熱アニールの組合せによる洗浄を施した p 型単結晶ゲルマニウム基板に対して、アモルファスシリコンの i 層、n 層を用いて作製した HIT 型ヘテロ接合太陽電池において、基板と i 層のバンドギャップ差が大きいにも関わらず、1,900nm 程度までの長波長領域においても電流を取り出すことができた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9-2) ヘテロ接合デバイス化技術の開発—超高周波プラズマ (三菱重工業)

<H22 中間目標> 単結晶あるいは擬単結晶シリコン-ゲルマニウム-スズ薄膜を用い、これにヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標: ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 微結晶 SiGe 発電層での試作と温度特性評価

ヘテロ接合界面の組成をステップ状に変更したバッファ層を設けることで、結晶性、発電効率、温度特性が改善されることを見出した。

b)ヘテロ接合デバイスの作製および評価

現状利用可能なナローバンドギャップ材料である単結晶 Ge を用いてヘテロ接合デバイスの作製、評価を行っている。ここで、Ge は清浄表面を得るのが難しい材料であるが、AES と LEED を用い、ケミカルプロセスとドライプロセスを組み合わせることで清浄表面が得られていることを観測した。また、a-Si を用いヘテロ接合を形成、a-Si の膜厚や c-Ge の界面処理による影響を調査し、特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効であることを見出した。最適化を行うことで変換効率を 4.23% まで向上させた。

c)温度特性の評価

同開放電圧の Ge ホモ接合セル（理論値）よりも良好な温度特性が得られていることを確認した（ホモ：-1.8%/℃、作製したセル：-1.3%/℃）。バンドオフセット評価についても IPE を用いて a-Si/c-Ge 電導帯のオフセット評価を実施。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

9-3)ヘテロ接合デバイス化技術の開発—低ダメージ成膜（京セラ）

<H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8%を達成する。その際の特性値として、開放電圧 0.3V 以上を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a)ヘテロ接合形成前表面処理

エッチングガスを用いた大面積均一エッチング条件を確立した。表面ラフネス増大回避のため、低エッチングレート（約 4nm/min）で Si 基板上の熱酸化膜除去を確認した。繰り返し再現性・エッチング潜伏期間の有無などについても調査した。また、Si[111]両面ミラー基板においてダブルヘテロ構造を作製した。 τ は、ウェット処理（希 HF 処理）の方がドライエッチング処理よりも大きく、ドライエッチング処理で低 τ となる原因（プラズマダメージ、表面終端状態など）を調査中である。ウェット処理による τ 改善評価については、処理法を探索中である。現在までに、化学パッシベーション（キンヒドロン/メタノール処理）による τ 値の約 50%まで到達している（ τ は大気中測定）。引き続き Ge 基板も用いて条件最適化・再現性向上・表面状態安定化などの改善を実施していく。

b)薄膜堆積（セル作製）

平成 22 年度に使用装置の新チャンバーを立ち上げる。低電力 RF 電源を導入し、プラズマダメージの低減とプロセス条件の安定性確保を図る。

c)バンドオフセット制御

使用チャンバーへの Ge ガス系統増設、および新チャンバーへの各種ガス系統導入準備、不純物ガス検出用 Q-MASS 設置などを行った。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

10)ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a)硫黄系太陽電池の開発

CIGSSe 系材料製膜装置を設計・導入し、CIGSSe 系薄膜の堆積実験に着手した。また、ワイドギャップ CIGSSe 太陽電池の高効率化技術の検討を行い、バンドギャップ 1.7eV の CuGaSe₂ 太陽電池で変換効率 9.7%を達成した。さらに、硫黄系ワイドギャップ太陽電池の作製と高性能化に着手した。

b)単結晶太陽電池作製技術

ワイドギャップ材料バルク単結晶育成装置を導入した。この装置を用いて、CuInSe₂ のバルク単結晶の育成に成功した。また、CIGSSe 系混晶のバルク単結晶の育成に着手した。これを基板として CIGSSe 薄膜の作製を行う予定である。

c)評価技術の開発

CIGSSe 系材料の欠陥および表面・粒界・バルクの評価に着手した。また、粒界領域のバンド湾曲の組成依存性の評価に着手し、局所領域の禁制帯幅の計測装置を設計した。さらに凹凸<10nm の縦貫断面を作製可能な技術を確立した。また、光-走査ケルビンプローブ顕微鏡を用いて、積層方向の電位プロファイルを評価する技術を確立した。

本研究開発を進めるにあたり、海外の研究協力機関である Helmholtz Zentrum Berlin の CIGS 系太陽電池研究グループの代表者である H. W. Schock 氏を招き、評価技術に関する課題を議論するとともに、今後の方向性について議論した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11) 構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発 (パナソニック電工)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 光吸収層のバンドギャップ分布制御技術

デバイス・シミュレーションからステップ形のバンドギャップ分布で高効率化を確認。液体ソースを用いたスプレー塗布熱分解法 (SPD) で光吸収層 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{S}_2$ 膜の膜厚、組成比、バンドギャップ制御を達成。また、溶液調製等で太陽電池に適した抵抗率 100-10,000 Ωcm への制御に成功。目標バンドギャップ 1.7-1.8eV に制御できる光吸収層に適した材料に目処が立った。また、製膜装置からの不純物混入による効率低下原因を究明。不純物混入防止策を施した結果、基本構成の CuInS_2 太陽電池の短絡電流が約 5 倍に増加し、効率 3.8%を得た。

b) 界面制御技術

SPD 法により、太陽電池に適した低キャリア濃度 $10^{12}/\text{cm}^3$ 、高移動度 $30\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の界面層 In_2S_3 膜の作製に成功。また、界面層 In_2S_3 膜の大気アニールでの酸化による低抵抗化が太陽電池短絡発生の原因であることを究明。界面層と光吸収層の連続製膜で短絡防止に成功。初期的な結果ながら、ワイドバンドギャップ光吸収層と組み合わせた太陽電池で開放電圧 0.71V を達成した。

c) 裏面コンタクト制御

デバイス・シミュレーションから光吸収層と裏面コンタクト層のバンドギャップ構成の最適化で短絡電流増加を確認した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 6 (2)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

12) 革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上系太陽電池での変換効率 9%を達成する。その要素技術として、以下を目標とする。ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命 1ns 以上、拡散長 0.3 μm 以上。1.9eV 以上 (波長 650nm 以下) で光吸収を持つ (量子効率 3%以上) GaP 基板上 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ 量子ドット太陽電池の作製。10 層以上の InAs 量子ドット超格子を形成し、顕微 PL 測定により、中間バンド形成が出来ていることを確認する。 $\text{In}(\text{Ga})\text{As}$ 系量子ドット太陽電池において波長 1,100nm で量子効率で 10%以上を達成する。H26 最終目標 : InGaP/GaP 量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。 InAs 、 InGaAs 系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

MBE 法において、 As_2 分子線や成長中断法を用いることにより、歪補償層を用いることなく、100 層以上整列した $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット多積層構造の作製に成功した。また、各ドットが電子的に結合した多積層量子ドット超格子を形成するため、量子ドット間を 2nm として 20 層の多積層化にも成功した。フォトルミネッセンスの励起光強度依存性から、世界で初めて 20 層以上の多積層量子ドット超格子のミニバンド (中間バンド) の形成を確認した。これらの技術を用いて試作した量子ドット太陽電池の変換効率はソーラーシミュレータで測定した実測値でも 12.6%を示し、世界トップレベルである。歪補償技術による量子ドット太陽電池では、量子ドット間バリア層の薄膜化に伴って N 濃度を増加する必要があるため、それによって V_{oc} が低下する問題がある。本研究では歪補償層を用いないため、ドット間を 3nm としても V_{oc} はほとんど低下しないことがわかった。

また、 $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子ドット層上に 2nm の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ キャップ層を成長することにより、量子ドット

トの光応答特性が 1,100nm にまで長波長化することを見出した。50 層の $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子ドット太陽電池の作製により、1,100nm で外部量子効率 2.5%を達成している。
<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 9 (4)、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 0

13) 酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発 (物質・材料研究機構)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 2.8eV 程度の InGaN を用いた太陽電池において変換効率 5%を達成する。そのための要素技術として 2.8eV 程度の InGaN で、Insec のライフタイム、InGaN を p 型化しキャリア濃度 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 以下を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 2.5eV 程度の InGaN を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。そのための要素技術として 2.5eV 程度の InGaN で 5nsec のライフタイムを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜の高品質化と良好な接合を形成することが本項目達成にとって重要である。InGaN 薄膜の E_g を InN 量を増大させることで 2.6eV まで低減化し、時間分解フォトルミネッセンスから InGaN 薄膜で 280psec のライフタイムを確認した。InGaN 薄膜へ $10^{19}/\text{cm}^3$ レベルの Mg ドーピングを行い、光電子分光測定から p 型化を示唆するフェルミレベルのシフトとゼーベック効果による p 型傾向も確認することができた。太陽電池として、GaN と透明高分子膜とのショットキー接合から $\text{FF}=0.69$ を達成。InGaN 薄膜を用いて短絡電流の向上を確認することができたが、 $\text{FF}=0.3$ と性能の向上が望まれる。SPRING8 での光電子分光を用いて評価した価電子帯トップのエネルギー位置をもとにバンドギャップを考慮して、In 組成に対する伝導帯ボトムエネルギーを求めた。キャリア輸送の観点からバンドオフセットを見積もることができた。InGaN 薄膜の向上と p 型化を示唆するデータから pn 接合太陽電池に向け接合を形成できる段階になってきたと考えられる。酸窒化物材料として、ZnO 系薄膜を有機金属化学堆積法で作製した。品質を向上させるために薄膜成長表面での理論的な理解を試みた。c 軸配向しやすい ZnO 系材料は c 面方向に極性構造を持つために薄膜成長様式・水素雰囲気に対する安定性に大きな差が生じることが明らかとなった。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 3 (1)、論文(査読付) : 6 (6)、研究発表・講演 : 16、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

14) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 A (東京工業大学)

<H22 中間目標 : 高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ $\sim 2\text{eV}$ の太陽電池で変換効率 5%を達成する。その要素技術として、結晶シリコンよりもイオン化ポテンシャルが 0.5eV 以上大きいバンドギャップが $\sim 2\text{eV}$ の p 型酸化物半導体で裾状態密度 $10^{19}/\text{cm}^3$ 以下を目標とする。H26 最終目標 : ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) ワイドギャップ酸化物半導体の探索

価電子帯上端がカチオンの s^2 軌道から構成され高いホール移動度が期待できる新規酸化物 p 型半導体として SnO の高品位薄膜の作製を行い、 Cu_2O を除く他の Cu 系 p 型酸化物半導体に比べて高い移動度を示す薄膜が得られる条件を確立した。さらにこの新規 p 型酸化物半導体 SnO のカチオン置換ドーピングによる n 型化を試みた。ドーパントには Sb^{3+} を選択し、SnO に Sb_2O_3 を添加した焼結体をターゲットに用いた PLD 法により薄膜試料を作製した。ノンドープ試料が p 型の伝導性を示すことに対し Sb ドープ試料は n 型となった。Sb10%添加試料の電子濃度と移動度はそれぞれ $9.9 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 、 $0.4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ であった。

b) アモルファス酸化物半導体 a-IGZO 薄膜の高品位化

まず n 層として期待される n 型アモルファス酸化物半導体であるアモルファス In-Ga-Zn-O (a-IGZO) の太陽電池への可能性を探るために光電流測定を行った。a-IGZO 薄膜は室温で製膜しても高移動度、低欠陥濃度で TFT のチャンネル層として高い性能を示している酸化物半導体である。様々な条件で製膜した a-IGZO の η 、 μ 、 τ vs. σ_D を $h\nu=3.1\text{eV}$ 、 $\text{photon flux} < 5 \times 10^{13}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ の条件下で求めたところ、a-IGZO 薄膜の η 、 μ 、 τ は σ_D の増加に従って直線的に増加した。この結果からフェルミ準位の上昇に伴って再結合中心が減少しキャリア寿命が延びたと考えることができる。この結果より太陽電池としての可能性が期待されるが、実験条件などを更に詳細に詰める必要がある。

c) p 型酸化物半導体 Cu_2O 薄膜の高品位化

既存の酸化物 p 型半導体 Cu_2O 高品位薄膜作製に取り組み、単結晶と同等な輸送特性を示す高品位

薄膜の作製条件を確立した。しかしながら光学測定によるギャップ内準位の評価により $\sim 10^{18}/\text{cm}^3$ 程度のギャップ内準位の存在が示唆され、これらギャップ内準位の低減が次なる課題となっている。

d) ギャップ内準位の硬 XPS 測定による観察

ギャップ内準位の存在は n 型の a-IGZO、p 型の Cu_2O 何れにおいても光学スペクトルで観察されているが、これではギャップ内のどこにどのような準位があるか不明であった。そこで SPring-8 のビームラインを用いて硬 XPS 測定を行ったところ、a-IGZO、 Cu_2O ともに価電子帯直上に多量の準位が存在していることが明らかとなった。またこれらの準位は製膜条件の最適化で低減できることも明らかとなった。

e) 高品位 SnO 薄膜の作製

先にも述べたとおり新規酸化物半導体 SnO の高品位薄膜作製に取り組み、PLD 法によるエピタキシャル薄膜の作製手法を確立し、高移動度 p 型薄膜、ドーピングによる n 型薄膜の実現につながった。ヘテロ接合の作製については、高品位 Cu_2O 薄膜を用いたデバイス作製に取り組んでいるが、芳しいデータは得られていない。そこで Cu_2O 薄膜上に他の薄膜を成長させる際の Cu の価数変化を詳細に調べたところ、界面付近では Cu の価数が 2 価になっていることが明らかとなってきた。 Cu_2O を用いた高性能デバイス実現には界面における Cu の価数制御技術確立が課題であり、界面作製条件の最適化に取り組んでいる。また、 Cu_2O の問題とは区別して a-IGZO の太陽電池としての可能性を評価するために p-Si と n 型の a-IGZO のヘテロ接合を用いた太陽電池を試作した。変換効率は 6.1%を達成したが V_{oc} が $\sim 0.38\text{mV}$ と小さい。これを改善するために In-Ga-Zn の組成比を変えることでバンドオフセットを大きくすることに取り組んでいる。新規酸化物半導体 SnO で p/n 両型の伝導性制御が実現したことから、これを用いたホモ接合を試作し評価を行った。整流特性は得られたものの逆バイアス印加時のリーク電流が大きいなど問題点があり、SnO のキャリア濃度制御手法の確立などと合わせて改善に向け取り組んでいる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 4 (4)、研究発表・講演 : 12、新聞・雑誌等への掲載 : 3、展示会出展 : 0

15) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 B (豊橋技術科学大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 5%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ・ Cu-Ag-O 単一配向膜を実現し、これを用いて 0.8V の開放電圧を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ・ Cu-Ag-O 単一配向膜にて移動度 $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 多接合太陽電池の光吸収層用ワイドバンドギャップ高品質酸化物材料の開発とバンドギャップ制御技術の確立

0.95-1.65eV-CuO 層ならびに 2.1eV- Cu_2O 層形成ならびにバンドギャップ制御技術、単配向・高光電流応答 CuO 層ならびに単配向・室温バンド端発光 Cu_2O 層形成など高品質化技術の確立を達成した。

b) 単接合太陽電池の形成と高性能化

サブストレート型ならびにスーパーストレート型 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ 太陽電池形成技術、ならびに極めて優れた整流性を有する $[111]\text{Cu}_2\text{O}/[0001]\text{ZnO}$ 高品質積層体を形成する高品質積層体形成技術を開発した。

c) 多接合太陽電池の構築

Ga:ZnO/ Cu_2O 積層体の形成に着手しオーミック電極選定の見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 42、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

16) 化合物系タンデムセルの開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 20%を達成。Ge 基板上でバンドギャップ 1.0-1.4eV の CIGS 系太陽電池により変換効率 13%を達成。H26 最終目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 25%を達成。>

タンデム太陽電池を作製するために必要な要素技術がほぼ確立できており、中間目標は今年度中に達成可能と考える。

a) モノリシックタンデム技術

透明導電膜上太陽電池の高効率化に関して、Na の導入法の検討を行い、Na の拡散を促進する手法を見いだした。また、セレンラジカルを用いることで、通常の製膜温度より 100°C も低い 450°C でも

変換効率 16%以上の高効率を実現した。

b) メカニカルタンデム技術

GaAs 基板から太陽電池層を剥離する技術を確認した。また、剥離した太陽電池層を TC0/ガラス基板上に接着する技術の開発に着手した。また、剥離した GaAs 系太陽電池と他の太陽電池のメカニカルスタックによるタンデム太陽電池の作製に成功した。

c) ボトムセルの開発

Ge 基板の表面処理技術を開発し、組成を制御することでエピタキシャル薄膜の成長に成功した。また、Ge 基板上の CIGS 太陽電池の作製に着手した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

17) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 A (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 閾値エネルギー $2.5E_g$ (E_g はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の n 乗 ($n \geq 1.2$) の依存性を有する光電流を実現する。 H26 最終目標 : Si ナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率 10 %を達成する。 >

ナノシリコン結晶は、電気化学エッチングおよび液体中でのレーザーアブレーション法により作製した。この方法により、発光強度が強く、かつ、バンドギャップエネルギーが異なる 2 種類のナノシリコン結晶を得た。水中でナノ秒レーザーアブレーションにより作製したナノシリコン結晶は、青色発光を示し、大気中でも安定であった。また、溶液中に浮遊する小さなナノシリコン結晶の TiO_2 ナノチューブテンプレートへの堆積法を開発した。このような複合物はガラス基板上に分散したナノシリコンよりも速い PL 発光強度の減衰を示したが、ナノシリコン結晶における励起子多重生成の存在を実証するに至っていない。しかし、ナノシリコンと TiO_2 の複合物は太陽電池特性を示しており、ハイブリッド太陽電池の可能性を示している。これまでの研究から、ガラス上に分散させたナノシリコン結晶において、PL 強度および光起電流が励起エネルギーに対し非線形増加する事を確認している。そこで、この現象を利用し、本研究開発では、高分子 (MEH-PPV および P3HT) とナノシリコン結晶間においてエネルギー移動することを確認した。このような複合材料の系では、増強された PL 発光の減衰がナノシリコン結晶のみの系と比較し、より強いことを明らかにした。しかし、高分子によるバックグラウンドの発光強度が非常に強く、ナノシリコン結晶中において励起子多重生成現象の有無を実証するに至っていない。一方、ナノシリコン結晶と高分子を混ぜ合わせた材料では、ナノシリコン結晶と高分子界面でバルクヘテロ接合が形成され、光起電力が発生する事を実験的に観測することに成功した。そこで、このような複合材料系におけるバルクヘテロ接合の最適化と、さらなる性能向上のため、ナノシリコン結晶と高分子の特性自体について研究を行った。その結果、グローブボックス内で p 型のナノシリコン結晶を高分子とブレンドした複合材料では、光安定性が飛躍的に改善される事が明らかとなった。特に、ナノシリコン結晶と P3HT とをブレンドした複合材料では、コンダクティビティーの明/暗比が 156 まで増大した。さらに、この系における光起電力は、ナノシリコン結晶の濃度が最大 40wt%まで発生し、この光起電流はナノシリコン結晶の濃度の関数として表すことができる事を見出した。しかし、現段階では太陽電池の最適化を行っておらず、太陽電池性能は低い。ブレンドした材料内における励起子の解離条件を満たしつつ、キャリアの輸送特性を改善するため、ポーラス状の TiO_2 ナノチューブ内にナノシリコン結晶/P3HT 複合材料を詰め込み、縦方向に配列させた。その結果、キャリア輸送特性が大幅に改善されることが明らかとなった。また、ナノシリコン結晶/ナノカーボンハイブリッド型太陽電池セルを開発するため、レーザーアブレーション法を水中で用い、光感受性のある自己組織化したナノシリコン結晶構造体の合成にも着手している。この工程では、連続的にプラズマと熱処理を施すことが可能であり、フラーレンやカーボンナノチューブのような有機材料をナノ構造体に堆積させる事ができる。そのため、この手法によって作製したナノシリコン結晶にフラーレンを堆積したハイブリッド材料では、ナノシリコン結晶とフラーレンが電氣的に結合する。その結果、このような系で受光感度を有するヘテロ接合が形成される事を明らかにした。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 18 (16)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

18) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 B (産業技術総合研究所)

＜H22 中間目標：半導体 CNT の純度を 90%以上まで向上させる。CNT のバンドギャップを遠赤外域の 0.2-1.3eV の範囲で制御し、0.1-0.5V の開放電圧を達成する。バルクヘテロ接合 CNT 太陽電池の量子効率の最大値を 50%以上とする。バンドギャップの 3 倍以上のエネルギーかつ $1\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以下の強度の光に対して、1 光子の吸収において 2 個以上の電子-正孔対の生成を確認する。H26 最終目標：CNT を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。＞

単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の最適条件を検討し、95%以上高純度半導体単層 CNT を抽出する技術を開発した(世界トップクラス)。また、平均直径 1.1nm を持つ単層 CNT を用いて、簡単かつ合理的な方法で、バンドギャップを遠赤外域の 0.8-1.3eV の範囲で制御を達成した。更に、バルクヘテロ接合太陽電池において開放電圧 (Voc) 0.57V (P3HT-PCBM/半導体単層 CNT)、0.37V (P(NDI2OD-T2)/半導体単層 CNT)、0.14V (ナノシリコン/半導体単層 CNT) を達成した。さらに、P3HT-PCBM バルクヘテロ接合有機太陽電池に半導体単層 CNT を加えることにより、量子効率は可視光領域で最大 65%以上(最高 73%) を達成し、変換効率は従来の 2.9%から 3.15% (最高 3.4%) まで向上した。本研究開発で開発した技術は様々なバルクヘテロ接合有機太陽電池に応用することができる。現時点においては P3HT-PCBM-半導体単層 CNT バルクヘテロ接合太陽電池の変換効率と量子効率の励起エネルギー依存性から、MCG 効果は確実に証明できていない。

＜成果発表件数＞特許出願(外国)：0(0)、論文(査読付)：0(0)、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

19) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 C (九州大学)

＜H22 中間目標：閾値エネルギー $2.5E_g$ (E_g はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の n 乗 ($n \geq 1.2$) の依存性を有する光電流を実現する。H26 最終目標：多重励起子太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して光電流量子収率 100%以上を目標とする。＞

「閾値エネルギー $2.5E_g$ (E_g はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を光子エネルギーをパラメータとして測定し、照射光の光子エネルギーの増加に伴い、依存性が linear から superlinear へと変化する多重励起子生成を示唆する結果を得た(中間目標の達成に目処)。また、「 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光波長依存性を測定し、波長 500nm 以下でキャリア生成を確認した。光電流生成効率は短波長ほど増加した。今後、絶対値較正により、量子収率を得る予定である(中間目標の達成に目処)。「 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の n 乗 ($n \geq 1.2$) の依存性を有する光電流を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を測定して、光子エネルギーが $2.8E_g$ の光に対して、照射光強度の 2 乗の依存性を有する光電流を実現した(中間目標を達成)。

＜成果発表件数＞特許出願(外国)：0(0)、論文(査読付)：7(2)、研究発表・講演：48、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

20) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 D (東北大学)

＜H22 中間目標：カーボンナノチューブの構造制御により E_g を 0.2-1.3eV の範囲で制御し、 $V_{oc}=0.1-0.5V$ を達成する。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$ の光入射において、ヘテロ界面及び pn 接合内蔵 CNT を用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1 光子吸収 2 個以上電子-正孔対形成を確認する。) H26 最終目標：pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 10%を達成する。＞

プラズマ CVD によるカーボンナノチューブ合成時の触媒膜圧、合成温度、ガス圧力、合成時間等を制御することによって、 $E_g=0.2-1.3eV$ の範囲の CNT を合成することに成功した。また、CNT にフラーレンを内包させることによって、仕事関数を制御した CNT を形成した。この構造制御した空の CNT 及びフラーレン内包進化 CNT を用いた薄膜状太陽電池を作製し、ソーラーシミュレータ及び発光ダイオードを用いて、紫外・可視領域、及び近赤外領域の光照射下で電流-電圧特性評価を行い、最大で各々 $V_{oc}=0.53V$ と $0.32V$ を達成した。CNT で構成された太陽電池の場合に、強度が単位時間あたり $3\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以下の光入射において、エネルギーを変化させて出力電力を測定し、エネルギーが約 $2E_g$ 以上の条件で、変換効率が徐々に増加する傾向が観測された。この現象は、Ag/n 型 Si の太陽電池の場合には観測されていないため、CNT における多重励起子生成の可能性を示唆している。また、単独

1本のpn接合内包CNTの形成に成功し、直径1mmに集光したレーザー照射による電圧-電流測定を遂行中である。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):9(9)、研究発表・講演:51、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

21) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討A(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標:有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$ を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100nmを目標とする。H26 最終目標:単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$ を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で $1\mu m$ を目標とする。>

有機分子線蒸着装置や昇華精製(トレインサブレーション)装置を導入し、基板上的 C_{60} の結晶成長技術や、有機半導体として最も高い移動度を示すルブレンの結晶成長技術を確立した。結晶の評価をX線回折およびAFMにより行った結果、数 $10\mu m$ 以上におよぶ高品質の単結晶が得られていることを確認した。特に、昇華精製法では、数mm角かつ厚み数 μm の薄片状のルブレン単結晶の作製に成功している。ルブレン単結晶は静電的吸着により基板への実装が可能であり、太陽電池化に適している。実際に、単結晶ルブレン(p型)に対して C_{60} (n型)薄膜を成長させて、有機半導体単結晶の太陽電池化技術を確立した。一方、ルブレンおよび C_{60} 単結晶の励起子拡散長は、現在過渡吸収分光を導入して測定中である。また、n型半導体 C_{60} の不純物ドーピング制御を目的として、有機分子線蒸着法によるマグネシウムのドーピング技術を開発した。マグネシウムドーピング量を精密に制御することで、膜の導電率、界面抵抗およびトラップ密度の制御を可能とした。更に、このドーピング膜を陰極バッファ層として導入した C_{60} とPcのp-n接合セルを作製し、太陽電池特性の高性能化に成功した。更に、Si/ C_{60} の有機/無機ヘテロ接合セルは、現在作製中である。また、有機p-nヘテロ接合太陽電池の構造最適化により、まず、ルブレン- C_{60} などにおいて高開放電圧 $V_{oc}=E_g-0.3V$ の発電機構を明らかにした。更に、平成23年度から展開予定の研究項目、単結晶性有機薄膜ヘテロ接合太陽電池の開発を、現在前倒しで行っている。具体的には、有機ヘテロ接合セル実現に向けて、有機ヘテロエピタキシャル成長技術の検討を行い、ルブレン単結晶のステップエッジでの C_{60} 結晶の成長を確認した。これは、有機半導体での単結晶-単結晶接合の可能性を示唆するものである。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:5、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

22) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討B(東京工業大学)

<H22 中間目標:有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、 $V_{oc}=E_g-0.3V$ を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100nmを目標とする。H26 最終目標:単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、 $V_{oc}=E_g-0.1V$ を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で $1\mu m$ を目標とする>

新規にイオン液体を用いた有機薄膜・単結晶合成のための有機フラックス製膜装置を開発した。また、イオン液体のコンビナトリアル蒸着技術を確立した。イオン液体をフラックスとして用いて、 C_{60} では $10\mu m$ 程度、ペンタセン、ルブレンでは数 $100\mu m$ の単結晶の育成にも成功した。また、項目21)と共同で、ルブレン/ITO基板上にイオン液体を介して C_{60} 薄膜を堆積し、イオン液体の効果により、大きいグレインサイズの C_{60} /ルブレン有機/有機ヘテロ接合を作製できた。さらに、極薄のイオン液体の表面張力を活かした接合技術を検討し、長期間にわたる接合力を確認した。中間評価に向けての達成度として、 C_{60} のグレインサイズ $10\mu m$ は達成され、さらに他の有機結晶についてもフリースタANDINGの数 $100\mu m$ の単結晶ができるなど、予想以上の成果を得た。一方、励起子拡散長の測定では、測定自体が難しく、評価できていないので、今後、産業技術総合研究所と共同でさらに検討する。有機/有機ヘテロ接合作製において、イオン液体の効果を確認できた事は大きな成果であるが、太陽電池特性評価までには至っていないので、早急に評価する。また、無機/有機ヘテロ接合の太陽電池については、作製プロセスの検討に着手した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):3(1)、研究発表・講演:25、新聞・雑誌等への掲載:1、展示会出展:0

23) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 A (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、1eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として 5%以上、2eV (>2Eg) 以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率 200%以上を達成する。H26 最終目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

有機化合物半導体と分子性導体 (TTF-TCNQ 等) との接合を形成し、一般的な金属電極との接合に比べて数倍高い電荷分離効率が得られることを見出した。これらの接合を用いて有機化合物半導体の MIM 型プロトタイプ単結晶デバイスを構築し、有機化合物半導体として世界で初めて光起電力効果の確認に成功した。さらに、本デバイスにおいて、従来の有機太陽電池では不可能であった 1eV 以下の赤外領域の光電変換に成功した。また、単結晶デバイスにおいて励起子拡散長を評価する手法を開発した。本手法を用いて、有機化合物半導体の励起子拡散長が一般的な (単成分) 有機半導体の値 (数 10nm) よりはるかに大きい 20 μm 以上であることを見出した。以上から有機化合物半導体が太陽電池用半導体材料としてきわめて有望なことを確認し、かつ光電変換特性と界面電子状態の相関について重要な知見を得た。これらの作製した素子は単結晶プレーナ型であるため、電極間の電位勾配が小さく正確な分光量子効率の評価には至っていないが、逆バイアス下での測定から 2eV で 2%の量子効率を得た。今後、短チャネル化、薄膜多層化、及び接合に用いる電極の最適化によって目標達成の見込みである。多重励起子生成について、有機化合物半導体 TTF-CA 単結晶において、低温で 2.25eV の光子エネルギーのポンプ光励起により 8-20 個の電荷移動励起子が生成することが明らかになった。今後、キャリア増倍の可能性について検証を進める。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 0

24) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 B (理化学研究所)

<H22 中間目標：強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として 5%以上を達成する。また、ポンプ-プローブ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長光照射下での量子効率の増幅率として 2 倍以上を目標とする。H26 最終目標：強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として p、n 層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧 0.5V 以上を目標とする。>

10 種類の強相関酸化物と n 型半導体である Nb ドープ SrTiO₃ との整流性接合を作製し、電気特性や光電流アクションスペクトルを評価して、バンド接続の材料依存性を明らかにした。多重キャリア生成が期待しにくい系ではあるが、LaMnO₃ との単一接合で、疑似太陽光下で効率 0.01%、FF=0.63 を達成し、分光量子効率の最大値は 3%程度を達成した。多重キャリア生成が期待できる電荷整列材料では Nb ドープ SrTiO₃ との接合でノッチやスパイクが形成されキャリアを電流として引き抜けないことが明らかとなった。多重キャリア生成に最適な材料を用いて実験的に光電流で増幅効果を検出するためには、光生成電流にこだわることなく、逆バイアスを印加した光検出器モードでの評価を行う必要がある。また、ノッチやスパイクを形成せずにバンド接続にグラデーションをかけるなどデバイス構造の工夫が必要である。一方で、強相関酸化物では少数キャリアの拡散長が 8nm と短いことが解った。これを解決するため、有機太陽電池で採用されているバルクヘテロ接合を可能にする酸化物の組み合わせを探索し、ZnO とペロブスカイトの組み合わせが有効であることが解りはじめた。強相関電子の光励起とこれが生み出す多重キャリア生成のシミュレーションを実行可能な、実時間量子ダイナミクス電子状態計算アプリケーションのプロトタイプを開発した。このアプリケーションを用いることにより、2 次元強相関電子系における多重励起キャリア生成の鍵となる諸量、例えば照射光エネルギーの閾値や多重キャリアの生成量などの定量的評価が可能となった。今後は、現実のモット絶縁体に即したパラメータと多重キャリア生成の関係を吟味して、実証実験に最適な材料やデバイス構造への提言を行っていく。ポンプ-プローブ分光によるキャリア増幅は 5 倍を達成した。実際の接合で光電流としてキャリアの増幅効果を観測するためには、上記の実験上の工夫が必要不可欠である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 9 (9) 、研究発表・講演 : 31、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

25) 構造制御ナノ材料を用いた太陽電池（産業技術総合研究所）

＜H22 中間目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 1%を達成する。そのための要素技術として拡散長 $0.1\mu\text{m}$ を目標とする。H26 最終目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。そのための要素技術として拡散長 $10\mu\text{m}$ を目標とする。＞

a) プラズモン電荷分離技術

平成 20 年度に、単電極特性を調べるために光電気化学的な光電流電圧測定装置を立ち上げた。既存の太陽電池性能評価装置で太陽電池としての評価を行ったが、ほとんど応答は得られなかった。レーザー分光測定のアクションスペクトルからは、プラズモン由来の光電流ではない機構も考えられた。平成 21 年度には、キセノン灯から分光器を通して得られる単色光に対する光応答が殆んど無かった状況から、金属担持方法を様々に変更した結果、銀ナノ粒子の場合、光電流のアクションスペクトルが吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因する光応答であることが示された。IPCE1% (425nm) を確認した。これは従来比で 10 倍以上の値である。また、金属ナノ粒子からの光励起電子が酸化チタン中を移動可能な距離について、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約 $1\mu\text{m}$ の酸化チタン膜厚でも光電流を確認した（拡散長の目標達成）。平成 21 年度後半から現在までに、金や銀のナノ粒子の形状を棒状や三角形に調製して、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。

b) 高効率太陽電池化要素技術

平成 20 年度に、酸化チタンナノ粒子からなる Au ナノコロイド電極を作製し、レドックス電解液を用いた太陽電池を作製、光電変換特性を評価した。一般的に用いられるヨウ素レドックス電解液では Au コロイドが溶解し、光電変換特性を示さなかった。一方、 WO_3 ナノチューブを用いた薄膜電極を作製し、光半導体電極として機能することを明らかにした。平成 21 年度には、Au ナノコロイドならびに酸化チタンナノ粒子からなる光電極ならびにポリマー電解質を用いた太陽電池デバイスの作製、特性評価をおこなった。加えて、CdSe 量子ドット系ならびに色素系において、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル (TEOS) により処理することにより、太陽電池の光電流が大幅に向上し、変換効率 2%を達成した。

中間評価に向けての達成度としては、本研究開発では、担当研究員の特色を活かして各要素技術開発を進めてきており、目標値を越える結果も得られ、着実に成果を挙げてきたといえる。これまでに、例えば、金や銀のナノ粒子の形状に異方性を持たせて、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。また、光電流のアクションスペクトルが銀ナノ粒子の吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因することが示され、IPCE1% (425nm) を達成した。最近では棒状の金ナノ粒子（アスペクト比約 3）の光応答の方が球状の金ナノ粒子に比べて数倍大きい結果も得られている。拡散長についても、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約 $1\mu\text{m}$ の膜厚でも光電流を確認できた（目標値の約 10 倍）。さらに、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル (TEOS) により処理することにより、CdSe 量子ドット系ならびに色素系における太陽電池の光電流を向上させ、変換効率 2%を達成した。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：0 (0)、論文（査読付）：5 (5)、研究発表・講演：16、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会展：0

26) メカニカルスタック技術の開発 A（産業技術総合研究所）

＜H22 中間目標：分光感度の異なる 2 種類の太陽電池を接合させ、2 端子セルとする際に、接着抵抗 $0.5\Omega/\text{cm}^2$ 以下、接着部の透過率 90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの 80%以上の電流密度を得る。H26 最終目標：メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。＞

a) Si 系単結晶薄膜太陽電池の開発に必要な基板の作製

陽極接合法を応用し、シリコンウェハ/TCO/ガラス基板の接合体を形成できることを見出した。接合機構としては、ガラス中に含まれる陽イオンが陰極側に移動し、接合界面近傍のガラス中に負に帯電した陽イオン欠乏層が形成され、TCO 薄膜とガラス側の酸素イオンが化学結合することによって接合しているものと考えられる。また、接合に必要な温度・電界の関係を把握し、TCO の抵抗率は、陽極接合後においても低抵抗 ($<1\times 10^{-3}\Omega\text{cm}$) であることを確認した。

b) セル間の電気・光学・機械的接合を可能にする接合方法の検討

表面ラフネス $R_{\text{ms}}0.3\text{nm}$ 以下の平坦性に優れた非晶質 In_2O_3 薄膜を形成させ、同薄膜同士を圧着・加熱し、非晶質相を固相結晶化させることにより電気・光学的接続が可能であることを見出した（抵抗率約 $3\times 10^{-4}\Omega\text{cm}$ 、波長 400–1,700nm の範囲で吸収 10%以下）。現在のところ接合強度は弱く、

強度改善を図るため材料及び表面処理方法を検討している。また、フラットパネルディスプレイのドライバIC を実装するなど電氣的接続材料として使用されている市販の異方導電接着フィルム（導電粒子を均一分散させたエポキシ系樹脂フィルム）の導電粒子分散量を減少させ透明性を改善させた樹脂（波長 500-1,700nm の範囲で吸収 10%以下）を用い、TCO/樹脂/TCO の接着抵抗の確認（約 $5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ）、2 端子メカニカルスタック太陽電池の試作と評価、接合部での課題抽出を行った。張り合わせる太陽電池として、スーパーストレート型 a-Si:H 太陽電池と a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型（HIT）太陽電池を作製し、前者の裏面電極および後者の表面電極として ITO を用い、導電粒子を両 ITO 電極に接着させることで電氣的接続を図った。その結果、開放端電圧 1.435V（シングルセルの足し合わせ 1.463V）、短絡電流密度 $11.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、曲線因子 0.719、変換効率 11.6%と 2 端子セルとして動作すること、電圧ロス、曲線因子ロスが殆どないことを確認することができた。なお、セル面積は上部セルサイズ（上部 a-Si:H セル 1.08cm^2 、下部 HIT セル 0.90cm^2 ）にあわせて計算した。現状の課題として、張り合わせ時のボトムセルの分光感度がやや低いことが挙げられ、接着部の樹脂層の厚さが $10\mu\text{m}$ 程度と厚いことによる横方向の光の逃げあるいは導電粒子での吸収等が要因と考えられる。今後、要因を明らかにし、太陽電池に適した樹脂、導電粒子の種類およびサイズを検討する。

<成果発表件数>特許出願（外国）：6（4）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：6、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出席：0

27)メカニカルスタック技術の開発 B（東京農工大学）

<H22 中間目標：T-ACF で接着抵抗 $0.5\Omega/\text{cm}^2$ 以下、実効屈折率 1.8-2.0、実効消光係数 $3-5\times 10^{-5}$ 、光透過率 70%を達成する。H26 最終目標：T-ACF を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

a)接合特性理論的検討

シミュレータを用いて電氣的・光学的に好適な接合材料の検討を行った。結果、透過率 70%、接合抵抗率 $0.5\Omega\text{cm}^2$ を個別開発目標と定めた。

b)透明酸化物導電粒子開発

透明酸化物導電体微粒子製造装置を導入し、サブ μm の微粒子形成に成功した。さらに種々導電体粒子の調査を行った。

c)透明有機バインダー開発

さまざまなバインダーを調査し、 150°C で硬化し、安定して使用できる透明性ポリイミドを見出した。

d)透明導電性接着剤特性

$70\mu\text{m}$ ITO 粒子を分散したポリイミド接着剤を開発した。可視-近赤外域で光学透過率 80%、接合抵抗 $2.5-10\Omega\text{cm}^2$ を達成した。

e)多接合セル実証

産業技術総合研究所提供の a-Si:H p-i-n セルと HIT シリコンセルを $70\mu\text{m}$ ITO 粒子分散ポリイミド接着剤を用いて接合し 2 端子セル動作に成功した。Voc=1.34V と高い値を得た。本実証により 2 端子セルを実証する平成 22 年度中間目標を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出席：0

28)高度光閉じ込め技術の開発 A（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を 20%向上させる。その要素技術として半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量 50%以上を目標とする。多層構造を利用した新規なフォトニック導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長弁別率を 50%向上させる。H26 最終目標：周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を 20%向上させる。本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

a)光散乱基板（フォトニック基板）光学設計

光学計算ソフトを用い、効果的な光閉じ込め効果が期待できる光散乱基板の設計パラメータを探索した。結果、Ag 反射板上に適切な回折格子を形成することにより、半導体中を伝搬する近赤外光の 50%以上を散乱させる基板パラメータ（周期 $0.6-1.6\mu\text{m}$ 、アスペクト比 0.25 以上）を明らかにした。

b) 光散乱基板（フォトリソグラフィ）作製技術

今回想定する光散乱基板の作製技術となる TCO 膜の製膜、回折格子構造のパターニング（周期 $2\mu\text{m}$ 以下）、埋め込み製膜、平坦化処理（CMP）の個々について開発を行い、必要とされる構造を実現するための技術を確立した。今回実現した TCO 膜自体への 2 次元高精細パターニングは太陽電池の分野でこれまで報告例の無い新規性ある技術である。また、作製した TCO 回折格子構造の角度分解した光学特性を調べ、設計通りの回折挙動が実現できることを確認した。

c) 光散乱基板（フォトリソグラフィ）の太陽電池構造における原理実証

Ag 反射層/TCO 次元回折格子からなるフォトリソグラフィ基板を開発し、これを薄膜微結晶 Si 太陽電池に適用した。その結果、平坦基板に較べて近赤外感度を 100%向上させることに成功した（ただし、平坦化未処理）。平坦化した場合にも近赤外感度の大幅向上は十分実現可能と見込まれる。

d) 波長弁別中間層（フォトリソグラフィ導電膜）光学設計

光学シミュレーションツールを用い、従来構造に較べて波長弁別率を 50%以上向上させる波長弁別中間層（3 層構造、カットオフ波長 800nm）を設計し、パラメータを確立した。

e) 波長弁別中間層（フォトリソグラフィ導電膜）原理実証

スパッタ法並びに CVD 法により実際に波長弁別中間層（3 層構造）をガラス基板上に作製し、設計通りの光学特性が得られることを確認した。またこれを 2 接合薄膜シリコン太陽電池に適用し、トップセルの光電流が向上することを確認し、原理実証に成功した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：5（2）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

29) 高度光閉じ込め技術の開発 B（大阪大学）

<H22 中間目標：プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を 20%向上させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。H26 最終目標：新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を 30%向上させる。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

a) プラズモン活用型透明導電層

ナノサイズの Ag 孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御することができることを実証した。（平成 22 年度中間目標をほぼ達成）

b) 微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証

上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に比較して、800nm より長波長領域での光感度を 20%以上向上させることができた。（平成 22 年度中間目標を達成済み。プロセス整合性を吟味中。）

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：9（9）、研究発表・講演：32、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

30) 高性能透明導電膜の開発（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：可視・近赤外領域（波長 400-1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 以下、波長 1,700nm における吸収係数 $6.0 \times 10^3 / \text{cm}$ 以下を同時に達成する。200°C以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。H26 最終目標：本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

a) 透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜の構造、光学特性、および電気特性の関係を、XRD、TEM、TDS（昇温脱離ガス分析）、SE（分光エリプソメトリー）、および Hall 測定装置を用いて調べた。その結果、結晶化（170-180°C）に伴いキャリア濃度は減少（約 $4 \times 10^{20} / \text{cm}^3 \Rightarrow 2 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ）、移動度は増加（約 $40 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \Rightarrow 120 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ）すること、薄膜内部からのガス（ H_2O 、 H_2 、 O_2 、In、InO など）の熱脱離過程と電気特性に関連があり、非晶質領域あるいは結晶粒内部の状態（薄膜内に導入された H、OH、 H_2O と原子~ナノスケールの欠陥の状態）が電気特性に大きく関与していること、結晶化に伴う電氣的・光学的移動度の大幅な増加は、有効質量の変化のみでは説明することはできず、キャリアの散乱が大幅に低減していること、結晶化によりキャリアの生成過程が変化（酸素欠損が抑制され H がドナーとして活性化する）し、それによりキャリア散乱が大幅に抑制されていることが示唆されること、などが分かった。

b) 低エネルギー損失窓電極の開発

上記の結果より、高い移動度を示す $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ 薄膜を得るには非晶質および結晶質層内部の状態が非常に重要であること、その状態を間接的に調べる方法として TDS が有効であることが分かった。その結果を受け、薄膜製造時の H_2O 、 O_2 量を正確に制御することにより薄膜内部の組成・構造を制御し、その結果、高移動度を維持した状態で低抵抗率の薄膜を作製できることを見出した。最大プロセス温度 200°C において抵抗率 $2.7 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 、波長 $1,700\text{nm}$ の吸収係数約 $5 \times 10^3/\text{cm}$ と中間目標を上回る特性を得た。現在のところ、抵抗率 $2.2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ の薄膜が得られている。また、新たな添加物等を添加することにより、高い透明性を維持した状態で更なる低抵抗率化を検討している。

一方、平成 20 年度の段階で $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$ を微結晶シリコン薄膜太陽電池の窓電極に適用した。その結果、窓電極に ITO を用いた場合に比べ、可視～近赤外域の分光感度の向上、それに伴う電流密度、変換効率の向上を確認した。したがって、現在開発中の透明導電膜は、薄膜型多接合太陽電池においても反射・吸収損失を低減させ、高効率化に寄与するものとする。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 6 (3)、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

31) 高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : ナノパターンガラス基板 (1cm 角以上) 上での透明導電膜において、従来 (例えば SnO_2) に比して、おおむね 2 倍の移動度 ($80\text{--}100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) および半分の電気抵抗率 ($2 \times 10^4 \Omega \text{cm}$) を達成する。H26 最終目標 : ナノパターンガラス基板 (10cm 角以上) 上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。>

a) ナノインプリントした高性能ガラス基板技術の開発

平成 20 年度は 1cm 以上のサイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成し、平成 21 年度はナノインプリント中の真空環境導入により、平成 21 年度中に 2cm サイズの達成の目は得た。平成 22 年度では、より一層の加熱加圧条件の最適化により 10cm 以上サイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成出来る見込みである。

b) 高性能ガラス基板を使った高性能透明導電膜の開発

平成 20 年度には、直線状のナノ凹凸を持つナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積実験の結果、配向性が向上することを明らかにした。平成 21 年度には、直線状ナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積では、ナノ壁付近での結晶核分布が、通常のガラス基板とは大きく異なることを見出した。その結果、配向性が向上し、さらに粒径の増大によるキャリア散乱の低下と移動度向上に寄与する可能性を明らかにした。平成 22 年度においては、上記基板を利用したより低抵抗のナノパターン透明導電膜の形成とその上へのシリコン系半導体や液晶分子の単結晶あるいは配向膜の合成条件の検討において、ガラス基板表面と成膜条件のより一層の最適化により目標を達成出来る見込みがある。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 20 (20)、研究発表・講演 : 27、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

【平成 23～24 年度】 (第 2 回中間評価時)

1) メカニカルスタック・デバイス化技術の開発 (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 接着抵抗 $2 \Omega \text{cm}^2$ 以下、吸収損失 10% 以下の接合技術を開発する。接合技術を多接合太陽電池に適用し、変換効率 20% を達成する。H26 最終目標 : 接合技術の高度化により多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。>

化合物薄膜系の接合技術として、透明導電性テープを用いた媒体接着技術およびファンデルワールス力を用いた直接接合技術の開発を行った。特に後者に関しては、ブロック共重合体を介して接合部に導電性ナノ粒子配列 (Pd, Au 等) を挿入した新技术を開発した。ナノ粒子ドメインは、接合界面に微小 ($\sim 50\text{nm}$) かつ高密度 ($\sim 10^{10}/\text{cm}^2$) に配列するため、低抵抗かつ高透明性を有する。接合品質としては、接着抵抗 $2 \Omega \text{cm}^2$ 以下、吸収損失 2% 以下 (波長 $1,100\text{nm}$) であり、これは平成 24 年中間目標を満足する特性である。また、これらの接合技術を用いて化合物薄膜系

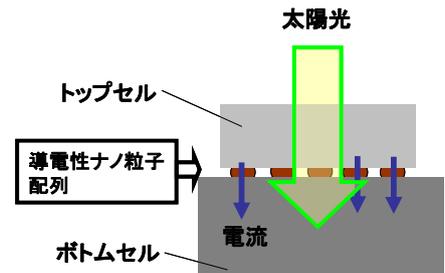


図 9. 導電性ナノ粒子配列を用いた直接接合

多接合太陽電池を試作した。特に、新直接接合法により GaInP (Eg-1.89eV) /GaAs (Eg-1.42eV) 2 接合太陽電池と InGaAsP (Eg-1.15eV) を接合した太陽電池を試作し、変換効率 21.85%を得た。本接合法の有効性は確認されたので、今後はさらなる高効率化とともに、さまざまな種類の太陽電池での接合を試みるとともに、実用化に向けて信頼性の確認や大面積化の方策を検討する。

非晶質透明導電膜の固相結晶化を利用した接合についても検討した。接合強度を支配する要因について詳細に調べ、表面平坦性と同時に結晶化時の結晶粒サイズおよび脱ガスが重要な要因であることを見出した。なお、抵抗率は約 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 、波長 400-1,700nm の範囲で吸収 10%以下と電気・光学的接続は問題ないことを確認している。Si 系単結晶薄膜太陽電池の開発に必要な基板の作製については、これまでに、陽極接合法を用いることにより、Si ウェハ/ITO/ガラス基板の接合基板を形成できることを見出してきた。今回、ITO/ガラス接合部が原子レベルで接合していること、陽極接合過程において Si/ITO 界面が電気特性に悪影響を与えないことを本接合基板を用いて作製したヘテロ接合型太陽電池 (ITO/n 型 a-Si:H/i 型 a-Si:H/p 型 c-Si ウェハ/ITO/ガラス) の電流-電圧特性より確認した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 2 (2) 、研究発表・講演 : 10、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

2) メカニカルスタック技術の開発 (東京農工大学)

<H24 中間目標 : シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。H26 最終目標 : シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

20 μm 級 ITO 粒子をエポキシ系透明接着剤に分散した透明導電性接着剤を開発した。透過率 80%、接合抵抗 $1.8 \Omega \text{cm}^2$ を達成した。この接合抵抗は 10cm 角サイズの試料に、1V で約 110A を流す能力を意味しており、20%超の高効率多接合ソーラーセル作製に十分対応できる低抵抗レベルである。また-30~+60°Cのヒートサイクル試験を実施しており 300 時間経過段階では接着特性に変化はない。高圧ガス加圧法を用いたプレス技術及び装置を開発した。本技術を用いて、4 インチ Ge 及び GaAs 基板の貼り合わせに成功した。Ge 及び GaAs 基板は偏加圧により破損しやすい材料である。本技術により、シリコンのみならず様々な半導体大面積ソーラーセルの多接合化の可能性が確認できた。上記低接合抵抗は本ガス加圧法により達成したものである。ITO 粒子以外にも仕事関数の異なる Au、Sn、Ni 及び Cr 粒子による導電接着剤開発を検討している。Sn 粒子により $5 \Omega \text{cm}^2$ の接合抵抗が得られている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 2 (1) 、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

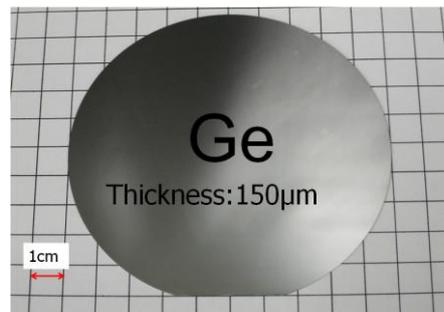


図 10. 4 インチ Ge 基板を ITO 分散接着剤にて張り合わせた試料

3) ヘテロ接合デバイス化技術の開発 A (三菱重工業)

<H24 中間目標 : 単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を用いたボトムセルの高効率化材料に適した界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発し、同材料を用いたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池の変換効率 9%を達成する。メカニカルスタック多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : 単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を用いたボトムセルの高効率化材料に適した界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発し、同材料を用いたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池の変換効率 10%を達成する。メカニカルスタック多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

平成 22 年度までに p 型単結晶 Ge 基板を用いたヘテロ接合太陽電池の高効率化にホスフィン (PH₃) を用いた界面処理が有効であることを見出し、変換効率 6.54%を得ている。この値は Ge 基板を用いたヘテロ接合太陽電池としては世界最高効率である。平成 23 年度より、この界面処理技術をさらに高度化するために、以下のことを行った。

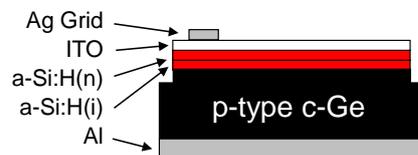


図 11. 作製したデバイス構造

a) 界面に存在するリン(P)の定量化

界面に P が残留していること、 PH_3 界面処理条件により P 残留量が制御可能であることを SIMS を用いて確認した。太陽電池特性は P 残留量に依存しており、界面処理条件によって太陽電池特性が制御できることが示された。

b) 界面バンド構造の観測

走査型キャパシタンス顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy : SCM) を用いてヘテロ接合界面のバンド構造を観測した。 PH_3 暴露処理の有無により Ge 基板中のキャリア濃度勾配に明らかな差が生じており、界面に存在する P がドナーとして働き、界面処理によってバンド構造の制御が可能であることが示された。

c) ヘテロ接合のバンドオフセットの観測

XPS による a-Si:H(i)/c-Ge のバンドオフセット評価を行った。X 線により励起された電子が離脱可能な膜厚の a-Si:H(i) を製膜した試料と、離脱不可能な膜厚を製膜した試料で価電子帯スペクトルを比較し、価電子帯オフセットが約 0.62eV、伝導帯オフセットが約 0.42eV であると見積もられた。

d) ヘテロ接合形成条件の影響把握

界面処理と同様に Ge 表面への処理であり、太陽電池特性に影響を与えられとされる a-Si:H(i) 層の製膜条件の影響を確認した。その結果、界面処理と同様に太陽電池特性を大きく左右することが示された。

以上の結果より、ヘテロ接合太陽電池の特性改善にはヘテロ接合界面の制御が非常に重要であることが示され、今後、これまでに確立した評価手法を用いて界面処理条件および a-Si:H(i) 層製膜条件の最適化を行うことで、目標値の達成が可能であると考えている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

4) ヘテロ接合デバイス化技術の開発 B (京セラ)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム (SiGe)、シリコンゲルマニウムスズ (SiGeSn) などの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で変換効率 9%、特性値として開放電圧 0.3V 以上を達成する。更に本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。>

ヘテロ接合形成工程を、a)ヘテロ接合形成前表面処理、b)薄膜堆積 (セル作製)、c)バンドオフセット制御の三段階でプロセス開発を行ない、セル特性評価までの各段階で少数キャリアライフタイム (τ) をモニターすることで効果を定量的に比較検証している。各段階の評価では Si 及び Ge 単結晶基板を用い、各段階の問題解決には以下の方針で取り組んでいる。a)ドライ又はウェット処理による高 τ 化、b)PCVD 低電力堆積条件によるプラズマダメージの低減、c)不純物元素の導入によるバンド制御。

a)ヘテロ接合形成前表面処理

平成 22 年度までの温水処理による Si 基板の大幅な τ 向上の成果がヘテロ接合の高品質化にどの程度寄与するかと、界面の状態を確認するために、同処理基板への a-Si 膜堆積と SIMS による不純物分析を実施した。a-Si 膜堆積後のライフタイム評価では従来の HF 処理と差が無い結果となり、前処理方法に適した a-Si 堆積条件の探索が必要との知見を得た。また温水処理では界面での酸化物層の増加とともに不純物としてアルミが検出された為、従来の純水設備に加え超純水の使用が可能な実験環境を整えた。効果については今後確認する予定である。また断面 TEM 観察から、同じ a-Si 膜堆積条件下でも、Si 基板上では界面品質劣化の要因となる Si エピ領域の形成が認められたのに対し、Ge 基板上では認められず、Ge 基板における a-Si 膜堆積条件のプロセスウィンドの広さが予見できる結果を得た。Ge 基板の表面処理については a-Si 堆積後のライフタイム評価で HF 処理比約 4 倍の値が高濃度塩酸処理で得られた。

b)薄膜堆積 (セル作製)

平成 23 年度に低電力実験用チャンバーが復旧したことから実験を再開している。平成 22 年度に

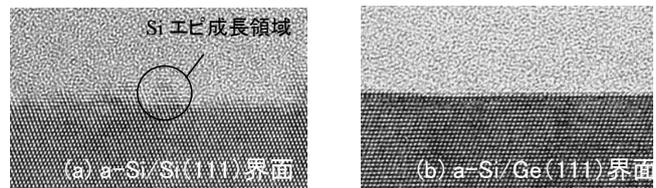


図 12. ヘテロ界面の TEM 断面像

Si 単結晶基板で効果のあった a-Si 低電力堆積条件を Ge 単結晶基板に適用し、更に圧力条件を振ることで Si 基板との傾向の違いをライフタイム評価から確認し、比較的抵抗の p 型 Ge 基板において 48 μ sec のライフタイムが達成できた。セル化評価については今上期中に実施予定である。

c) バンドオフセット制御

モノゲルマンガスの使用準備が完了しているが、装置トラブルによる研究の遅れとベースとなる a-Si 膜の低電力堆積条件の実験データが不十分の為、未着手である。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (1)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 0、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

5) 高度光利用技術の開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 開発した光閉じ込め構造を太陽電池に利用し、相対効率向上 15%以上を達成する。開発した光閉じ込め構造を他のサブテーマで開発されたデバイスプロセスと組み合わせ、変換効率 20%達成に資する。H26 最終目標 : 開発した光閉じ込め構造を実際のスタックセルに適用し、相対効率向上 20%以上を達成する。開発した光閉じ込め構造を他のサブテーマで開発されたデバイスプロセスと組み合わせ、変換効率 25%達成に資する。>

平成 22 年度までに開発した技術をベースに、表面平坦性を保ちながら光散乱性を有するフォトニック基板を開発した。作製したフォトニック基板を薄膜シリコン太陽電池に適用し、相対発電効率向上 8%を得た。特筆すべきはフォトニック基板に期待される高い開放電圧・曲線因子を維持したまま光電流のみを増加させる効果が実証できた点であり、今後の効率改善への重要な成果が得られた。更に、海外研究機関と協力しながらフォトニック基板を高度化するための方策を光学シミュレーションにより検討した。その結果、屈折率分布形状の適正化及び材料の吸収損失抑制を行うことで、現状構造と比較して 30%以上の光電流増加が可能であることが示され、中間目標の相対発電効率 15%以上は十分達成可能と考えられる。現在は中間目標の達成に向けて計算結果に基づく高性能フォトニック基板の作製プロセスの開発に注力している。また並行して多接合薄膜太陽電池へのフォトニック基板適用も進め、現時点までにモノリシック型の多接

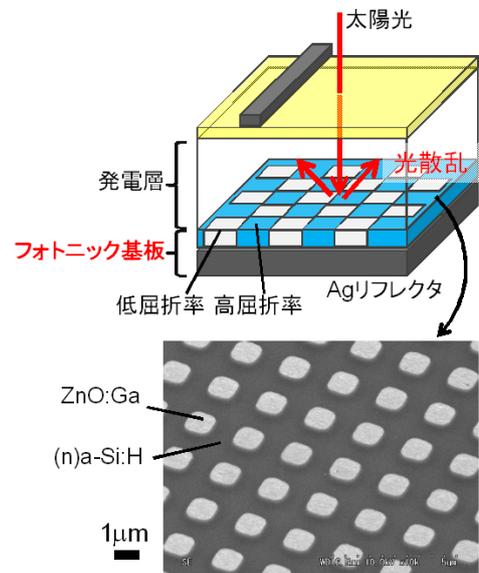


図 13. フォトニック基板の概念図と作製した基板の SEM 像

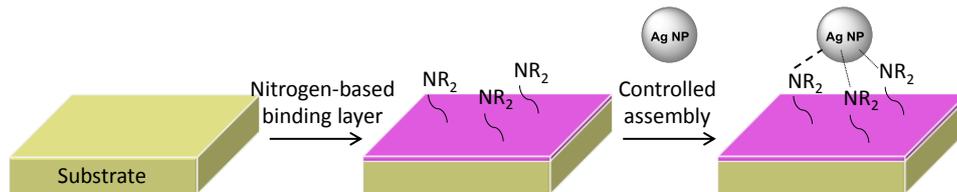


図 14. ウェットケミカル手法による金属ナノ粒子の分散

合薄膜シリコン太陽電池において発電効率 10.1%を得るとともに、課題抽出を行っている。また、フォトニック基板を補完する光利用技術としてのプラズモン効果実証のために、薄膜シリコン太陽電池作成プロセスに適用可能なウェットケミカル手法を用いた金属ナノ粒子構造作製手法を開発した。はじめにフラットな基板上に作製したスーパーストレート型薄膜シリコン太陽電池を用いて、純粋なプラズモニック光散乱による光電流増加を確認し、近赤外領域において 75%の外部量子効率向上を確認した。現在、これらの結果を基に、より精密なパターンングを可能とするプラズモニック光閉じ込め構造作製手法としてフレキシブルスタンプを用いる印刷手法の開発を進めており、光学シミュレーションとの比較検討により構造最適化を図り、太陽電池への適用を行なっていく。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 6 (2)、研究発表・講演 : 9、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 2

6) 高度光利用技術の開発 B (大阪大学)

＜H24 中間目標：プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を 20%向上（相対効率 15%向上）させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。H26 最終目標：新規に開発する光閉じ込め構造により、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べての相対効率を 20%向上させる。また、本技術を用いて産業技術総合研究所等と協働して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。＞

a) プラズモン活用型透明導電層

ナノサイズの Ag 孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御できることを実証した。

(平成 24 年度中間目標を達成)

b) 微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証

上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に比較して、800nm より長波長領域での光感度を 7~35%以上向上させるとともに、相対効率で約 8%増大を得た。(光感度向上については、平成 24 年度中間目標を達成済みで、変換効率改善に向けての研究開発を遂行中)

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：4（4）、研究発表・講演：10、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

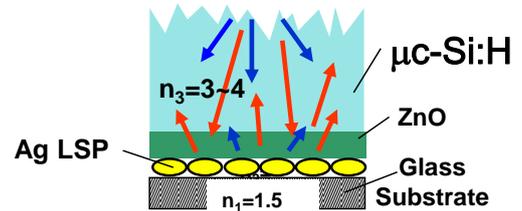


図 15. プラズモン効果の概念図

7) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

＜H24 中間目標：バンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池セルで変換効率 9%以上を達成する。H26 最終目標：バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池セルで変換効率 10%を達成する。＞

○SiGe エピタキシャル成長における Ge 原料の坩堝の選定、成長温度を検討し、残留不純物の低減化に成功した。SiGe 薄膜にガリウムを均一にドーピングする手法を開発し、正孔濃度の精密制御法を確立した。

○Si 基板上と SiGe 薄膜層の間に組成傾斜バッファ層の導入を検討した。組成傾斜層を導入しない場合、 $10^9/\text{cm}^2$ 台の高密度の貫通転位が伝搬するのに対して、導入することにより転位密度が $10^6/\text{cm}^2$ 以下まで大幅に低減した。

○SiGe ヘテロ接合太陽電池 ($E_g \sim 1.0\text{eV}$) を作製した。外部量子効率感度は波長 1,200nm まで長波長化し、光電変換効率は 0.98%であった。デバイスシミュレータを用いて SiGe 薄膜太陽電池の系統的な動作解析を行い、特性改善の指針を検討した。SiGe 薄膜太陽電池において、少数キャリア寿命の増大が効率向上に最も重要であることを明らかにし、現在の開発指針の妥当性を確認した。

○高効率化に向けた新しいデバイス構造として両面ヘテロ接合を検討した。Ge 基板上で両面ヘテロ接合太陽電池を世界で初めて試作し、開放電圧と短絡電流の向上および温度係数の改善を確認し、両面ヘテロ接合化が Ge 系太陽電池でも有効であることを明らかにした。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：4（3）、研究発表・講演：17、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

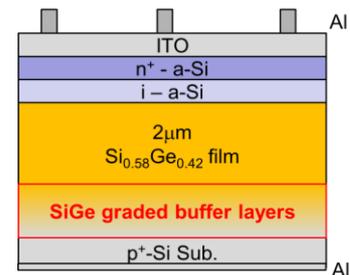


図 16. 試作した SiGe ヘテロ太陽電池の構造

8) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 B (コーニング)

＜H24 中間目標：ガラス基板上シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を基体としたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池で、変換効率 9%を達成する。その要素技術として、単結晶薄膜の転位密度として $5 \times 10^7/\text{cm}^2$ を目標とする。H26 最終目標：ガラス基板上シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を基体としたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池で、変換効率 10%を達成する。その要素技術として、単結晶薄膜の転位密度として $10^7/\text{cm}^2$ を目標とする。＞

○バンドギャップ 0.9eV 以下に相当する Ge 組成約 0.5-1 で厚さ $3 \mu\text{m}$ 以上の SiGe 単結晶薄膜を、バルク Si および Ge 結晶基板、ガラス上 Si および Ge 薄膜基板のそれぞれに、反応性 CVD 法により初めて、世界最高水準の成長速度 2nm/s 以上で成長することに成功した。同様に MBE 法により厚

さ 1.4 μm 以上の SiGe 単結晶薄膜をガラス上 Ge 薄膜基板の上にエピタキシャル成長し、Ge 組成 1.0 の薄膜では 1,000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を越える良好な移動度を得た。また、反応性 CVD 法で Si 基板の上にバッファ層なしで成長した厚さ 4.7 μm の $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}$ 膜をアモルファス Si と積層したヘテロ接合セルを作製し、波長 1,400nm (0.89eV) までの分光感度を確認した。一方、ガラス上 Si 薄膜基板に反応性 CVD 法で厚さ 5.9 μm の $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 膜を成長する際、産業技術総合研究所で開発された MBE 法による厚さ 1.5 μm の傾斜組成 SiGe バッファ層を中間に挿入することで、過剰キャリア寿命が 0.062 μs から 16.3 μs に大幅に向上することを見出した。シミュレーションにより、このキャリア寿命から 10%を超えるセルの変換効率が期待され、現在セル作製の準備を進めている。

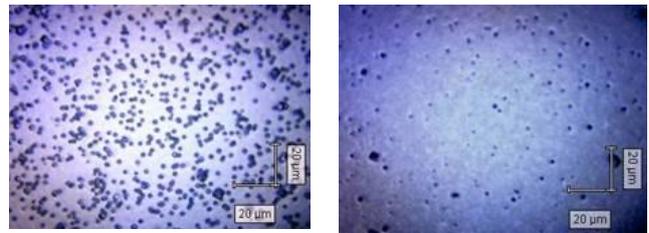


図 17. Si0G 基板上にバッファ層無 (左) 有 (右) で反応性 CVD 成長した $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 膜のエッチング後顕微鏡写真

- ガラス上 Si 薄膜基板に反応性 CVD 法で厚さ 5.9 μm の $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 膜を成長する際、産業技術総合研究所で開発された MBE 法による厚さ 1.5 μm の傾斜組成 SiGe バッファ層を中間に挿入することで格子不整合を緩和し、表面のエッチピット密度を $5 \times 10^6/\text{cm}^2$ から $1 \times 10^6/\text{cm}^2$ に低減することに成功した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 C (東京工業大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV 以下で 9%以上の変換効率を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV 以下で 10%の変換効率を達成する。>

SiGe 系薄膜作製のための反応性熱 CVD の原料ガスとして GeF_4 - Si_2H_6 系と GeF_4 - SiH_4 系について検討している。 GeF_4 - Si_2H_6 系では気相反応の抑制が可能な基板温度 350 $^\circ\text{C}$ における成長により、堆積速度は 0.2nm/s と遅いが、膜厚 1,210nm で $7 \times 10^5/\text{cm}^2$ の低転位密度が得られた。膜厚 600nm、Ge 組成 97%のエピ膜においては、Hall 移動度 767 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ が得られており、結晶性の高い Ge 膜が作製できているものと判断される。 GeF_4 - SiH_4 系では、490 $^\circ\text{C}$ の成長温度で、 GeF_4 のエッチングの寄与により、基板界面から 100nm 程度の領域において貫通転移の終端が見られ、高速堆積 (2.37nm/s) にもかかわらず、膜厚 427nm の膜で転位密度 $1 \times 10^6/\text{cm}^2$ が得られた。この二つの系における結果は GeF_4 を原料ガスに用いる系の特質を良く表しており、基本的に、目指すべき方向が明確となった。 GeF_4 - Si_2H_6 系では、今後、これらの条件で成長したエピ膜を用いて、太陽電池を試作し、素子特性を評価する予定である。 GeF_4 - SiH_4 系については、初期膜の堆積条件 (エッチング条件) を詳細に検討したうえで、最適条件を決定し、太陽電池の試作を進める予定である。

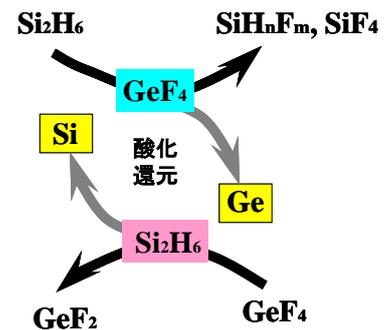


図 18. GeF_4 - Si_2H_6 系の反応



- ⇒ 擬単結晶発電層形成
固相成長によるシード層上のエピライク成長 (単結晶 Si 上で予備検討)
- ⇒ 大粒径シード層兼ドープ層の形成
アルミによる金属誘起結晶化 (AIC)

図 19. 目標とする SiGe 系薄膜ボトムセルの構造

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

10) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 D (東海大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶 SiGe 及び Ge 等を用いた太陽電池で変換効率 9% を達成する。要素技術として、粒径 5 μm 以上の単一配向シード層を得る。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶 Ge 等を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。エミッター層として機能を兼ねる粒径 5 μm 以上の単一配向シード層を得る。>

- Al を用いた非晶質 SiGe (Ge 組成比 30%) の金属誘起結晶化において、ほぼ均一な結晶 SiGe 層から数 μm ～数 $10\mu\text{m}$ の SiGe 島状結晶まで形状を制御してガラス基板の上に形成することに成功した。これらの結晶は[111]面方向に配向する傾向があり、擬単結晶の粒径 $5\mu\text{m}$ 以上の単一配向シード層を得るという平成 24 年度中間目標は達成できたと考えられる。
 - 電子ビーム蒸着法を用いて非晶質 Ge を作成することで、固相成長によるシード層からのエピタキシャル成長に成功した。エピタキシャル成長は非晶質材料の製法によって大きく影響され、K セル蒸着やスパッタ法ではランダム成長を示す。今後は非晶質の構造や不純物濃度などを詳細に検討することで、より安価な作製法を開発する。
 - 固相成長のシード層として、n 型の[100]結晶方位が最も適していることを見出した。固相成長はシード層の伝導型、結晶方位に大きく依存しており、その他のシード層では他方位の結晶成長が生じやすい。但し、上記はシード面から縦方向の成長であり、基板に沿った横方向の結晶成長では異なる可能性もあり、継続して詳細を検討する必要がある。
 - 今後は年度末に向けて、シード層上の結晶成長について、シード層形状及び非晶質材料特性を最適化することで良質のナローギャップ発電層を形成し、中心機関における変換効率 9%達成へ貢献できると考えている。
- <成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 20、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11) 有機単結晶材料ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 有機単結晶を用いた単接合で変換効率 4%を達成する。H26 最終目標 : 有機単結晶材料を用いた単接合で変換効率 10%を達成する。>

有機単結晶のヘテロエピタキシャル技術として、Si[100]基板上に C_{60} 薄膜のエピタキシャル成長を試み、 C_{60} 単結晶のエキソン拡散長を通常の 10nm から倍の 20nm まで増加させることに成功した。さらに結晶 C_{60}/Si の単接合セルを作製し、有機/無機ヘテロ接合による太陽電池の変換効率を最大 3.1%まで向上させた。また、有機単結晶太陽電池作製において重要な技術の一つである電極とのオーミック接合の最適化のため、分子線蒸着法によるキャリアドーピング技術を開発した。Mg および CuI、2 種類のドーパントを用いて、膜の導電率、仕事関数の精密制御を可能とした。また、電極/有機半導体界面へドーピングした pn 接合有機太陽電池を作製した。p 型半導体界面への CuI ドーピング層挿入により、変換効率は 0.8%から 2.6%に改善された。n 型半導体界面に Mg ドーピング層を挿入することで、目標変換効率 4%へ到達する見込みである。更に、ルブレンの単結晶で見出された Fission 現象を利用した多重励起子による太陽電池の原理検証を行った。ルブレン単結晶および薄膜を用いて、Fission による励起子生成から電荷分離までを過渡吸収分光法等を用いて評価した。Fission 過程は 10ps 程度であり、その後生成したトリプレット励起子のフラーレンへの電荷分離過程は数 100ns の過程であることが分かった。高効率化には電荷分離速度の向上が望まれる。

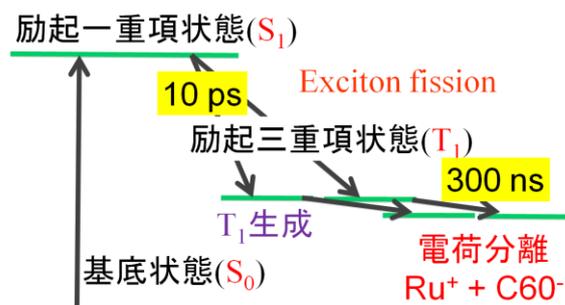


図 20. ルブレン単結晶での Fission 過程

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 3 (2) 、研究発表・講演 : 17、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

12) 有機単結晶材料ボトムセルの開発 B (東京工業大学)

<H24 中間目標 : ナノパターンを施した表面ナノ構造制御ガラス基板 (1cm 角以上) を作製する技術を確認し、その上への高性能透明導電膜の作製を行い、p 型、n 型太陽電池用有機単結晶からなる太陽電池を試作し、変換効率 4%を達成する。H26 最終目標 : 高性能ガラス基板および透明導電膜作製の本技術を用いて、p 型、n 型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を試作し、変換効率 10%を達成する。>

a) イオン液体を用いた有機電荷移動錯体単結晶のフラックス気相成長法の開発

これまでに、シングルレーザーを用いた有機フラックス製膜装置を用いて、有機電荷移動錯体結晶作製の予備検討を開始し、数 $10\mu\text{m}$ の板状結晶が形成される事を確認した。また、開発したツイーンレーザー型有機フラックス製膜装置を用い、蒸着ソースを独立に制御した有機電荷移動錯体結晶

の作製に着手した。当初の計画外ではあるが、結晶作製条件の最適化やこれら有機単結晶・薄膜を用いた太陽電池デバイスの作製には、イオン液体中での核形成を再現性よく制御することが重要との観点から、蒸着状態をモニターするデジタルスコープを本装置に搭載し、イオン液体膜やイオン液体中でのペンタセンの核形成と成長過程を実時間観察することが可能なシステムの開発を併せて行った。これにより、中間目標に向けて、ツインレーザーを用いた有機電荷移動錯体結晶のイオン液体フラックス合成の条件最適化を加速的に推進し、さらに太陽電池デバイス作製の歩留まりを大幅に向上させることができるものと期待される。

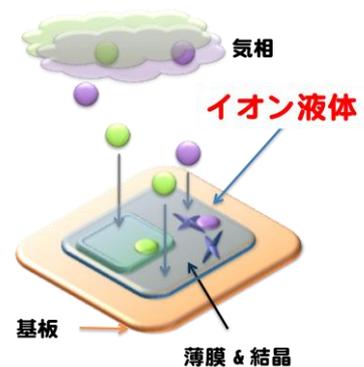


図 21. フラックス気相成長法

b) イオン液体を用いて気相成長させた有機半導体単結晶からなる太陽電池の試作

これまで、ペンタセンとフタロシアニンを用いたイオン液体フラックス法で成長させたハイブリッド型の p 層に n 層である PCBM を塗布し、太陽電池を作製した。デバイス構造が最適化されていないので、効率の絶対値は低いですが、イオン液体を用いない場合と比較して、効率が 2 倍になったことを確認した ($\sim 0.07\%$)。これについて、現在目標達成のために解決すべき課題として、残留するイオン液体が再結合中心になって、分離効率が著しく小さいこと、通常のバルクヘテロ接合にくらべ、p 層と n 層の界面が著しく小さいため、十分な電流値が得られないこと、が考えられる。イオン液体を介して作製したペンタセンや C_{60} 結晶をチャンネル材料として試作した電界効果トランジスタの移動度が、ペンタセンで $\sim 5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 C_{60} では、大気中の測定にもかかわらず、 $\sim 6\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ と大きな値であったことから、太陽電池による励起子拡散長は見積もれていないものの、イオン液体で作製した有機半導体そのものの特性は十分に高いものと考えられる。したがって、太陽電池の高効率化は、先の 2 つの課題を解決する事で、大いに期待できる。中間目標に向けて、これらの対策として、残留イオン液体を除去するためのソフトプラズマ処理を名古屋大学との共同研究で行う予定である。また、ツインレーザー型有機フラックス製膜装置を用いて、イオン液体中に p 層と n 層を同時供給し、イオン液体を介したバルクヘテロ接合を形成し、界面を著しく増大させる事を試みる。この方法では、通常の気相法による共蒸着とくらべ、イオン液体を介することで、個々の結晶の品質を向上させつつ、界面での電子・正孔の分離界面をバルクヘテロ接合並みに増大させることができ、結果として、著しい発電効率の向上が期待される。

c) 周期的ナノ壁構造を持つ太陽電池用高性能ガラス基板の開発

有機分子薄膜の高結晶性薄膜を得るためには、透明導電膜（インジウムスズ酸化物：ITO）をコートしたガラス基板上での有機分子結晶核の生成数を制御することが重要である。核生成数を増加させるために、ガラス基板表面に周期的なナノ溝配列をナノインプリント手法により作製し、その上に ITO 薄膜を堆積して周期的ナノ壁構造を持つ太陽電池用高性能透明導電膜ガラス基板を作製することができた。

d) 2cm 角サイズ以上の 200pm 高さのピコステップガラスの開発について

2cm 角のサイズを持つガラス板を使って、200pm 高さの階段状原子ステップ配列を持つサファイアモールドを使い、ナノインプリント時の条件として、真空中、 600°C 、3 MPa、300sec プレスにおいて、整列した 200pm 高さのピコステップガラスの作製に成功した。

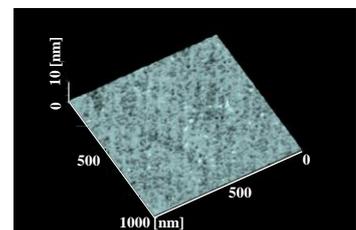


図 22. ピコステップガラスの AFM 像

e) 市販の ITO ガラス基板の表面平坦化プロセスの検討について

市販の ITO ガラス基板を、一軸圧縮のナノインプリントプロセスに適用し、ITO 下地のガラス基板表面の熱軟化を誘起して、平坦な ITO 薄膜が簡単に得られるかどうかを検討した。最適な温度や圧力の検討段階であるが、これまでの予備的なナノインプリント実験により、市販の ITO ガラス基板の表面粗さ（RMS 値）が、約 10%程度平坦になることを見出しており、本プロセスが市販の ITO ガラス基板の表面平坦化に有効である知見を得た。

f) 集光効率向上のための構造色を持つ光路制御型ナノパターンガラス板の開発について

表面ナノ周期構造に基づいて、光干渉して構造発色するガラス板の作製条件を検討している。これまでに約 5mm サイズの範囲で構造発色を確認することに成功した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：27（27）、研究発表・講演：46、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

13) ナノ材料系ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標：高純度半導体 CNT (99wt%以上) の抽出率は 20wt%以上を達成する。東北大学と協力して CNT 利用太陽電池の変換効率は 4%以上を達成する。半導体単層 CNT で多重励起子や多重キャリア (MEG) 効果を確認する。H26 最終目標：高純度半導体 CNT (99wt%以上) の抽出率は 30wt%以上を達成する。東北大学と協力して CNT 利用太陽電池の変換効率 10%以上を達成する。>

a) 高純度半導体単層 CNT の大量抽出技術開発

単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の条件を最適化し、半導体単層 CNT の純度 99wt%、抽出率 30wt%を達成した。更に、CNT の純度を向上させる為に、200°C、1 時間、真空中で加熱する事により、残分 (主に PFO ポリマー) を取り除くことに成功した。また、高純度半導体単層 CNT は蒸着不可能であること、スピコート方法ではロスが多いことから、スプレー法を用いた CNT の製膜技術開発を行った。

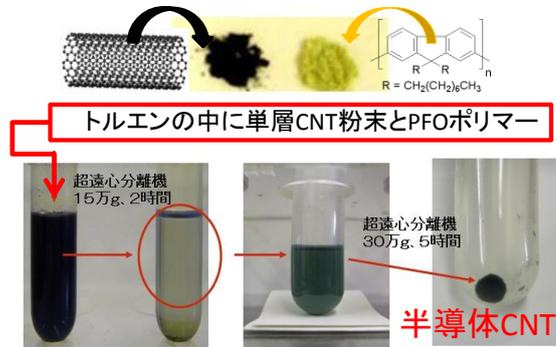


図 23. 半導体 CNT の抽出工程

b) 半導体 CNT を用いた太陽電池

高純度半導体単層 CNT とフラーレン材料を用いてヘテロ接合有機太陽電池を試作した。試作した太陽電池 (セル面積 4mm²) の特性は、変換効率 0.14%、Jsc=1.3mA/cm²、Voc=0.24V、FF=0.46、遠赤外域 (0.8-1.3eV) での量子効率最大 22%、可視光領域での量子効率最大 62%であった。今後、変換効率目標を達成する為には、半導体 CNT へのドーピングと CNT の配列制御などのデバイス最適化により Jsc と遠赤外域での量子効率を向上させることが必要である。

c) 半導体 CNT における、多重励起子や多重キャリア (MEG) 効果の実証

一本の半導体 CNT での MEG 効果は東北大学で確認されている。現在、半導体 CNT とフラーレンを用いたヘテロ接合薄膜太陽電池での MEG 現象の観測を試みている。2Eg 以上の光照射下において非線形な効果が確認されており、MEG 現象であるかどうかの確認を進めている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

14) ナノ材料系ボトムセルの開発 B (東北大学)

<H24 中間目標：pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 4%を達成する。明確な多重励起子生成 (MEG) 効果を確認する。H26 最終目標：pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

熱拡散法によりカリウムを部分的に内包した単一半導体 CNT を合成し、その電流-電圧特性を測定することで、pn 接合内蔵 CNT 太陽電池の赤外光照射時の発電を初めて観測した。また、1,550nm、1,650nm の赤外光照射時における発電効率は、それぞれ 3.8%、11.4%であり、CNT の光吸収効率に依存していることも明らかになった。また、プラズマイオン照射法によりセシウムを部分的に内包した単一半導体 CNT を合成し、その電流-電圧特性から、1,100nm の赤外光照射時の発電効率が 1.1%であることが分かった。プラズマ照射条件を最適化することによって、年度内に 4%以上の発電効率を実現できる予定である。また、CNT への内包処理に要する時間が、熱拡散法の 48 時間と比較して、プラズマイオン照射法では 15-60 分と極めて短いため、実用化のためにはプラズマイオン照射法が適していることを実証した。直径の異なる CNT を用いることで、CNT 太陽電池における多重励起子生成 (MEG) 効果に対する CNT のバンドギャップの依存性を調べた結果、バンドギャップの増大に伴い MEG が生じる入射光エネルギーの値も比例して増大することが分かった。さらに、MEG が生じる入射光エネルギー値は、バンドギャップの 2 倍のエネルギーより約 0.1eV 大きく、そのメカニズムについて詳細に調べているところである。

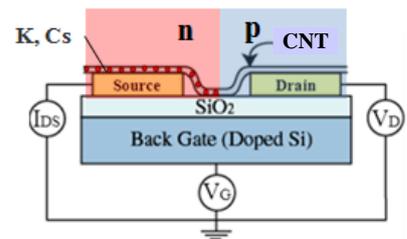


図 24. pn 接合内蔵 CNT 太陽電池

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 3 (0)、論文 (査読付) : 14 (14)、研究発表・講演 : 65、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

15) 強相関材料ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標：有機強相関材料を用いた積層型ヘテロ接合素子を作製し、1eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率 6%以上を達成する。有機強相関材料を用いた積層型ショットキー素子を作製し、多重励起子生成効果にもとづくキャリア増倍率 300%以上を達成する。H26 最終目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

- 真空蒸着法において、基板を低温 (約 100 K) に冷却することで、分子化合物の高均質薄膜素子を作製し、整流効果を確認することに成功した。
- ポリマー半導体成膜の独自技術であるプッシュコート法を用いて、単一成系有機半導体を対象としたセル形成を行い、1%程度の光電変換効率を得ることに成功した。現在、分子化合物材料および同様な系であるドナー・アクセプター型ポリマーについて、本手法による高均質な積層型薄膜素子の開発に取り組んでいる。
- 物理気相成長法を用いて、DBTTF-TCNQ、DBTTF-PMDA、PTZ-TCNQ、TMB-TCNQ の 4 種類の分子化合物について、高均質薄片単結晶を作製することに成功した。さらに、DBTTF-TCNQ について、単結晶ラミネート法により積層型素子を作製し、横型素子に比べて電流密度を 1,000 倍に改善することに成功した。
- 6 種類の分子化合物について、光電荷キャリアの拡散長を評価し、CT ギャップが大きな材料で拡散長が長くなる傾向を見出した。これにより、高効率化にむけた分子化合物半導体の材料選定指針が得られた。
- 光変調キャリア検出法により、分子化合物半導体内に生成した、電子と正孔の寿命が同一であることを見出し、両者の再結合が拡散長を制限していることを明らかにした。
- 光励起エネルギーを 0.8-4.7eV の範囲で可変な、光変調吸収分光測定装置を整備した。現在、励起エネルギーを変えた測定により、エネルギーギャップ 2 倍以上の領域でのキャリア増倍効果を検証中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出席 : 1

16) 強相関材料ボトムセルの開発 B (理化学研究所)

<H24 中間目標：強相関電子酸化物において、光誘起多重キャリア生成を起こす材料を開拓する。また、強相関電子酸化物を用いた接合において、逆バイアス印加によって電流増幅を行い、量子効率 100%以上を目指す。さらに、現実の太陽電池に即して、2 種類の強相関電子材料の接合において、光励起から電子-正孔対分離までをシミュレートできるアプリケーションプログラムを開発する。H26 最終目標：強相関酸化物ヘテロ接合に疑似太陽光を照射した際の発電効率が 10%以上であることを目標とする。そのため、p、n 層の化学ポテンシャル差と Voc の関係を明らかにして 0.5V 以上を達成する。また、多重生成したキャリアを外部へ効率よく取り出す p-i-n 接合のバンド接続の条件を明らかにする。>

これまでに、強相関電子酸化物と普通の半導体から成る pn 接合において、強相関電子酸化物での光吸収による光起電力を観測できたが、100%以上の量子効率を得ることはできなかった。そこで、逆バイアス印加による取り出し電流の増幅を目指して、強相関電子酸化物の一つである LaMnO₃ を用いた pn 接合を作製し、逆バイアスを印加しながら光電流を測定した。その結果、LaMnO₃ 中の空乏層幅が広がることによる光電流の増加を観測した。この結果を元に、強相関電子酸化物中の空乏層幅やキャリア密度を評価することに初めて成功した。また、これまでに、強相関電子酸化物における光誘起の多重キャリア生成現象をポンプ-プローブ分光により明らかにしてきた。この光誘起多重キャリア生成を伝導特性で実証するため、X 線照射効果を調べた。タングステン

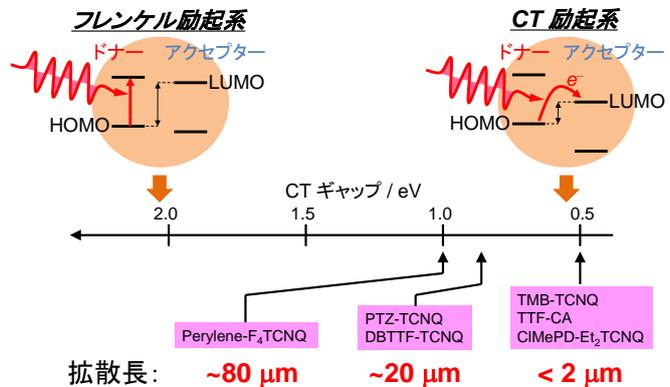


図 25. 拡散長と CT ギャップの関係

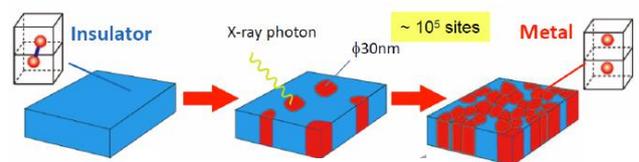


図 26. W:VO₂ における多重キャリア生成

ドーピングした二酸化バナジウム (W:VO₂) の薄膜に X 線を照射したところ、絶縁体から金属への相転移が観測された。この相転移の際に、X 線の光子 1 個当たり 10⁵ 個のキャリアが生成されていることがわかり、光誘起多重キャリア生成を伝導特性から明確に実証することができた。これまでに開発してきた理論的手法を発展させ、現実の系を電子スピンの相互作用や電子のバンド構造にモデリングし、接合系での光励起から電子-正孔対分離までをシミュレートできるアプリケーションプログラムを開発した。このシミュレーションでは、多重キャリア生成がおおよそ 100%を超える量子効率の増加をもたらす効果を示すことが明らかとなった。今後は、より現実を詳細にモデリング出来るアプリケーションの開発を進め、高効率太陽電池の理論設計を目指す。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (1) 、論文 (査読付) : 6 (6) 、研究発表・講演 : 21、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 0

17) ナノ材料系トップセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

平面ポリシラン材料の合成技術については、有機合成化学的手法により、ラダーポリシランを四塩化ケイ素から段階的に合成するボトムアップ型合成方法、ならびにケイ素化カルシウムから層状ポリシランを合成するトップダウン型合成方法を確立した。種々の分光的手法により、構造の同定ならびに薄膜のバンドギャップ特性を明らかにした。バンドギャップ制御したラダーポリシランや層状ポリシランの薄膜を用いて、現在太陽電池デバイスを作製中であり、今年度中には特性評価を行う予定である。CdS/CdSe 量子ドット増感型 TiO₂ 太陽電池において、セル変換効率 2.1%を得た。SiO₂ による絶縁層のコートにより、再結合が抑制され変換効率が向上することを明らかにした。トップセル用の吸収波長領域を有する有機色素分子を用いた TiO₂ 太陽電池において、変換効率 6.2%を達成した (トップセル用の透明 TiO₂ 電極と透明対極を使用)。ともに、今後のセル条件の最適化により、さらなる効率の向上が期待できる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 24 (14) 、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

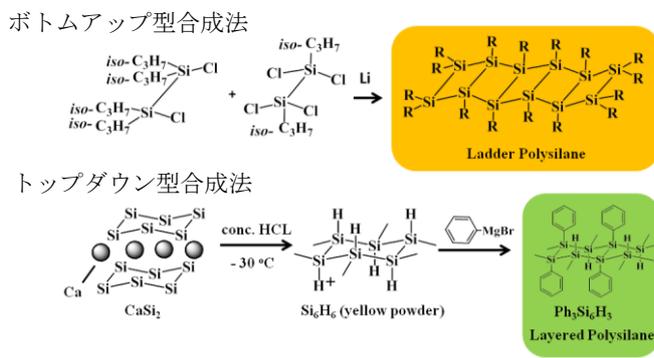


図 27. ラダーポリシラン、層状ポリシラン

18) ナノ材料系トップセルの開発 B (東京農工大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合ナノ結晶シリコン (nc-Si) 膜太陽電池で変換効率 10%を達成する。その特性値としては Voc=0.7V、Jsc=18mA/cm²、FF=0.8 を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の変換効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

量子サイズナノ結晶シリコン (nc-Si) のトップセル材料への適合性を、プロセス技術と光電特性の両面から確認した。

a) ナノ結晶シリコン自立膜の作製プロセス技術の開発

新規の剥離技術とアニールにより直径 8cm の自立膜を得た。p 型、n 型、pn 接合基板のすべてに対して、内蔵電界を有する nc-Si 単層セルを作製する技術を確立した。

b) 光電変換特性の測定

全試料のバンドギャップがトップセルの要件を満たすことを確認、すべての単層セルで光電変換効果を観測し、特に pn 接合基板から作製したセルでは目標を大きく上回る Voc=0.87V を得た。光電流の分光感度ピークが所望の短波長域にあることを裏付けた。

c) 関連光電子機能の解析

ホットエレクトロンの生成と電離衝突の過程を理論的に明らかにし、nc-Si ではバルクに比べて光



図 28. ナノ結晶シリコン自立膜セルの構造

キャリア増倍が発現しやすいことを見いだした。ドープした色素分子への光エネルギー伝達を裏付けた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 7 (7)、研究発表・講演 : 14、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

19) ナノ材料系トップセルの開発 C (九州大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a) バンドギャップ 1.7eV 以上のシリコンナノドットの生成

○ マルチホロープラズマ CVD 法により、結晶 Si ナノ粒子の生成に成功し、更に Si ナノ粒子径の減少に伴う、光吸収端の短波長側シフトを確認した。粒径 17nm で 2eV の光吸収端を実現した。

○ Si ナノ粒子生成用プラズマ源、表面処理ラジカル生成用プラズマ源を同一真空容器内にもつダブルマルチホロープラズマ CVD 法を開発し、1.7eV 以上のバンドギャップ (Eg) を有するコア/シェル構造 Si ナノ粒子によるポーラス膜のコンビナトリアル生成に成功した。

b) 多重励起子生成太陽電池で変換効率 10%を達成

○ コア/シェル構造 Si 量子ドット増感型太陽電池において、2Eg 以上の短波長領域で、効率の急激な上昇を観測し、約 70%の内部量子効率を達成した。(多重励起生成を示唆する結果)

○ TiO₂ ナノ粒子表面に ZnO バリア層を形成する新規セル構造を考案し、キャリア電子の電解液へのリークを低減し、初期の約 10 倍に相当する 1mA/cm² 以上の短絡電流値を達成した。

○ 短波長側の光吸収を Si ナノ粒子で、長波長側の光吸収を色素で行うことを目的とした Si 量子ドット/Ru 色素ハイブリッド増感型太陽電池を開発し、効率 3%を実現した。現在、高効率化のために、PEDOT:PSS 層を用いた Si 量子ドット/有機ハイブリッド型太陽電池の実験を行っている。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 5 (1)、研究発表・講演 : 19、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

コア/シェルSiナノ粒子ポーラス膜
Si₃N₄, SiC-Si
nano-particles thin layer (~50nm)

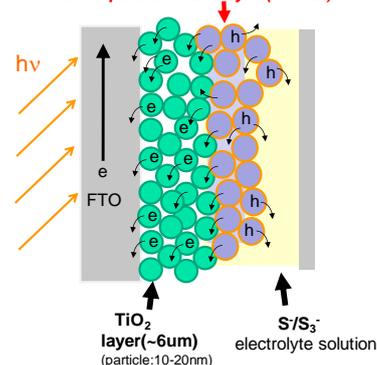


図 29. コア/シェル構造 Si 量子ドット増感型太陽電池の構造

20) 化合物系トップセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の太陽電池で変換効率 10%を達成する。InGaP/InGaAs 量子ドット太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV の太陽電池で変換効率 12%を達成する。InGaP/InGaAs 量子ドット太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a) カルコゲナイド半導体トップセルの開発

Cu(In_{1-x}Ga_x)(Se_{1-y}S_y)₂ (CIGSSe) の多元蒸着製膜 (三段階法製膜) において安定性と制御性の高い硫黄原料供給法を確立するために硫黄ラジカルセルを開発した。これにより S/(S+Se)比を変化させることが可能になり、1.0eV から最大 2.0eV の Eg を持つ CIGSSe 太陽電池を作製することができた。S/(S+Se)比が 0.8 の高濃度 S 太陽電池 (Eg=1.7eV、反射防止膜なし) で、開放電圧 0.83V、短絡電流密度 9.2mA/cm²、曲線因子 0.71、変換効率 5.3%が達成された。開放電圧、曲線因子は高特性が得られたことから、高濃度に S を添加しても結晶品質を損なうことなく硫黄の混晶化がされているといえる。電流密度が低特性であったのは、デプスプロファイル測定・キャリア濃度測定・外部量子効率測定による評価から、膜表面近傍に S/(S+Se)比の非常に高い領域が形成されていたことが原因であることがわかった。実際に S/(S+Se)比を 0.9 まで増加させバンドギャップを 1.8eV 付近まで高めても、組成分布の最適化 (バンドエンジニアリング) を行うことで電流密度 12.3mA/cm² が得られ電流の向上が確かめられた。直近の成果では硫黄の

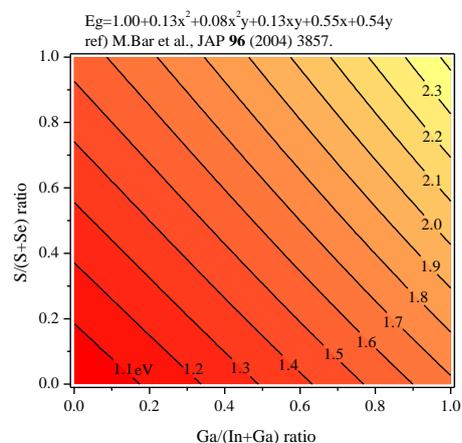


図 30. CIGSSe の組成とバンドギャップの関係

発光スペクトルと光強度を成長その場でモニタリングする機能を硫黄ラジカルセルに付加し、原料供給の精度を高めることができた。現在はこのモニタリング技術と製膜プロセスの改良による詳細なバンドエンジニアリングと薄膜高品質化から電池特性を向上させ目標達成を目指している。

b) P系ワイドギャップ材料

固体ソース MBE を用いて、バンドギャップ 1.9eV の InGaP 成長技術の高度化を行った。成長温度 480°C、成長速度 1.0 μm/h の時の膜質が最も良好であり、その条件で成長した InGaP 太陽電池は、AR コート無しで 8.2%の変換効率を達成した。これは、固体ソース MBE を用いた InGaP 太陽電池作製の、初めての系統的な研究である。理想的なバンド構造を持つ中間バンド太陽電池作製のため、InGaP 上の In(Ga)As 量子ドット形成を試みた。InGaP 上に InGaAs 量子ドットを直接成長した場合、わずか 1 分子層の成長で量子ドットが形成され始めることがわかった。また InGaP と In(Ga)As ドットの間に GaAs スペーサ層を導入し、量子ドットの量子準位が InGaP バンドギャップ中で制御可能であることを初めて見出し、中間バンド太陽電池の理想的なバンド構造に近づくことがわかった。現在は InGaP ベースの GaAs/InGaAs 量子ドット超格子の作製に着手しており、ミニバンド形成が期待できる。InGaP をベースとした GaAs/InGaAs 量子ドット太陽電池を世界で初めて試作した。20 層までの多積層量子ドット太陽電池において、ドット層数の増加に応じて外部量子効率、変換効率ともに増加することがわかった。変換効率は、10 層で 9.6%、20 層で 10.3%であり (AR コート有)、中間目標を達成した。GaAs ベースの InGaAs 量子ドット電池の場合はドット層数の増加に伴って変換効率は減少したが、InGaP 上の場合には 20 層まで単調に増加した。これは InGaP ベースの量子ドット太陽電池の有効性を示すものである。

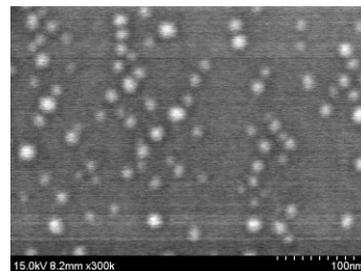


図 31. InGaP 上 InGaAs 量子ドット (1 分子層堆積後)

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 10 (5)、研究発表・講演 : 26、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

21) 化合物系トップセルの開発 B (パナソニック)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 10ns 以上、内部量子効率 90%以上、バンドギャップ以下の波長の全線透過率 80%以上を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 吸収層のバンドギャップ分布制御技術

液体ソースを用いたスプレー塗布熱分解法 (SPD) で Zn を固溶した新規ワイドギャップ光吸収層 ZnCuInS₂ (ZCIS) 膜を開発し、Zn 固溶率 0.2-0.3 でバンドギャップ 1.7-1.8eV の制御を達成。また、組成比と製膜温度の制御で ZCIS 膜のキャリア寿命 4ns を達成。バンドギャップ 1.8eV の ZCIS 膜を用いた太陽電池で変換効率 4.4%達成。

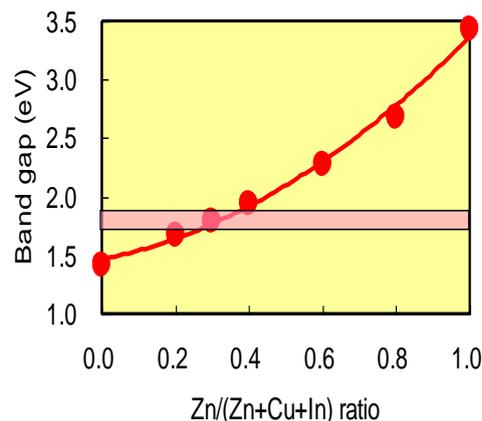


図 32. ZCIS の組成とバンドギャップ

b) 界面制御技術

n 形界面層 In₂S₃ 膜上への p 形光吸収層 ZCIS 膜の形成での元素相互拡散による電圧低下要因を把握。In₂S₃ と ZCIS 膜の間に光吸収層よりバンドギャップが広い ZCIS 層を形成し、光吸収層 ZCIS 膜の高温製膜による相互拡散を抑制することで、波長 390nm で量子効率 90%を達成。さらにワイドギャップ挿入層との屈折率調整で ZCIS 膜の吸収端波長より長波長での透過率 70%以上を達成。界面への挿入層の最適化で高効率化に目処。

c) 裏面コンタクト制御

裏面コンタクト層として p 形ワイドギャップ材料を検討し、CuGaS₂ を用いることで、短絡電流密度 (Jsc) が約 2 倍に増加。ただし、Voc は低下。組成の最適化等による Voc 低下抑制を検討予定。

d) 吸収制御技術

ヘイズ率 90%以上の拡散フィルムを用いることで、Jsc が増加し、効率 1.1 倍に増加。フィルムに

代わる光散乱層を独自に開発しへイズ率 90%以上を達成。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 2 (1)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

22)化合物系トップセルの開発 C (東京工業大学)

<H24 中間目標 : ワイドギャップ酸化物半導体 (バンドギャップ 1.7eV 以上) を用いた太陽電池で、変換効率 10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップが $\sim 2\text{eV}$ の酸化物半導体を新たに探索し、その欠陥密度の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。H26 最終目標 : ワイドギャップ酸化物半導体 (バンドギャップ 1.7eV 以上) を用いた太陽電池で、変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) ワイドギャップ酸化物半導体の探索

$5s^2$ 電子配置を持つ SnO の両極性発現に平成 22 年度まで注力した影響で遅れていたアモルファス In-Ga-Zn-O (a-IGZO) のナローギャップ化について、平成 23 年度から主に取り組み、Cd-Ga-O 系において製膜条件や組成比を制御することで a-IGZO よりバンドギャップの小さいアモルファス酸化物半導体が見出された。

b) ITO コートガラス基板上への p 型 Cu_2O 薄膜の高品位化

単結晶基板上への Cu_2O 製膜では Cu_2O 単結晶に近い移動度 ($\sim 100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) を有する薄膜製膜条件を既に確立したが、太陽電池を作製するためには透明電極上へ高品位薄膜を製膜する必要がある。そのため、ITO コートガラス基板上に高品位薄膜が得られる条件を探索した。その結果、高移動度薄膜を得るためには室温製膜後のポストアニール処理が有効であることを見出し、 Cu_2O が [200] 配向し移動度が $13\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に達する薄膜の製膜条件を確立した。しかしながら現状では、電気・光学特性の膜厚依存性が大きく、膜厚の増加と共にギャップ内準位が著しく増加する等課題も残されている。

c) ヘテロ接合作製

平成 22 年度までの研究で明らかになってきた界面における Cu の価数制御技術の確立に取り組んだ。実用化も見据え汎用性の高いスパッタリング法による製膜も開始した。スパッタリング法の場合、 Cu_2O 上へ酸化物を製膜すると直ちに表面の Cu が酸化され Cu^{2+} になること、 Cu_2O 薄膜成長初期においても Cu の価数は 2 価であるため製膜順序を変えても界面における Cu が 2 価であること、ポストアニール処理で Cu を 1 価に還元できるが膜厚の増加と共にその効果が薄れることなどが明らかとなったが、現時点ではこの問題を完全に解決するには至っていない。一方でスパッタ法よりプラズマの酸化力が弱いと考えられる PLD 法を用いて a-IGZO/ Cu_2O 太陽電池を試作したが、リーク電流が大きく J_{sc} が小さい特性しか得られておらず、ここでもやはり Cu の価数を如何に制御していくかが大きな課題である。p 型 Si/n 型 a-IGZO 太陽電池については a-IGZO 層の組成を変える (具体的には Ga 濃度を増やす) ことで伝導帯下端の位置の最適化を図り、高 Voc 化を目指した研究に取り組んだ。Ga の増加に伴い E_g を増加させることができた。しかしながら E_g の増加は伝導帯下端の上昇のみではなく価電子帯上端の低下も引き起こした。これに加えて欠陥準位の増加も認められ、当初期待したような高 Voc 化を実現することはできなかった。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

23)化合物系トップセルの開発 D (豊橋技術科学大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 10%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7eV 以上の Cu-O において $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成し、Cu-O/ ZnO 単接合太陽電池形成技術を確立する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7eV 以上の Cu-O 単一配向膜にて移動度 $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

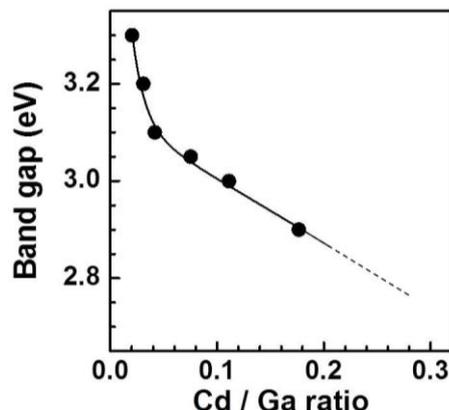


図 33. アモルファス Cd-Ga-O のバンドギャップ

a) 多接合太陽電池の光吸収層用ワイドバンドギャップ高品質酸化物材料の開発とバンドギャップ制御技術の確立
電気化学ヘテロエピタキシャル成長により Cu_2O 層 (バンドギャップ 1.7-2.1eV) を単配向化することによって移動度を約 30 倍向上させると共に、加熱処理により移動度がさらに向上することを明らかにした。現状の移動度は $21\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ だが、成長ならびに加熱条件の最適化により $50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ は達成可能である。また、Ag を電気化学的にドーピングすることによってキャリア密度が向上することも明らかにした。

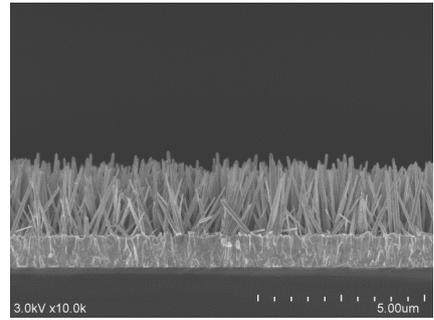


図 34. ナノピラー-ZnO

b) 単接合太陽電池の形成と高性能化

光アシスト電気化学製膜法を新規に提案しサブストレート型 $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ 太陽電池が形成できること、バッファ層として CdS 、 SiO_2 が有効であること、ナノピラー-ZnO を導入することによって均一層の場合に比べ短絡電流密度が 86%増加することを示した。

c) 多接合太陽電池の構築

多接合化を念頭に置いた $\text{FTO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}/\text{GZO}$ 積層体の形成に着手した。
 <成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

【平成 20~22 年度】 (第 1 回中間評価時)

1) ナノドット禁制帯幅制御 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : SiC/Si ナノドットの欠陥密度を $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以下にまで低減する技術を開発することにより、シングル接合セルで真性変換効率 5%を達成する。H26 最終目標 : Si ナノドット・シングル接合セルで真性変換効率 10%を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する (ナノドットセルからの真性変換効率 3%) 。>

a) Si ナノドット膜の欠陥密度低減

これまでに欠陥密度は、現状で $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ まで低減した。a- SiC バリア層に N を添加するなどの新技術開発を行ったところ、熱処理後の導電率が大幅に低下することが観察された。さらに微量の酸素添加を試みたところ、量子ドット太陽電池の大幅な特性向上に成功した。さらに最適化を行うことで中間目標 (欠陥密度を $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以下) を達成の見通しである。

b) 不純物拡散の抑制

この課題については、ドーピング層を最初に結晶化させ、それに引き続いて量子ドット層の熱処理を行うことで、ほぼ解決できた。

c) Si ナノドット太陽電池の開発

a- SiC バリア層に N を添加することにより量子ドット太陽電池の開放電圧が、165mV から 289mV まで向上した。これに引き続いて、微量の酸素添加を行ったところ、開放電圧がさらに 518mV まで向上した。この値は、M.Green らのグループにより得られた値よりも高く、 Si 量子ドットセルとしては、世界最高の値である。また、厚い n 型 Si 側から光を照射する構造のセルを試作したため、短絡電流が低く、変換効率は 0.1%であるが、ITO 側から光照射する構造を作製すれば、3.8%まで変換効率が向上するとの解析結果を得た。ITO 側から光照射する構造の開発とその構造の最適化により電流値を向上させることにより、中間目標 (真性変換効率 5%) を達成の見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 14、新聞・雑誌等への掲載 : 3、展示会出展 : 2

2) マルチエキシトン (東京工業大学)

<H22 中間目標 : Si 量子ドットの遷移エネルギー $E_g < 3.3\text{eV}@1\text{nm}$ 領域における、マルチエキシトン生成 ($2E_g$) 等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能な Si 量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。H26 最終目標 : p-i-n セル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。>

a) バンドエンジニアリング

光電子分光法 (XPS) により、 Si と CaF_2 の化学結合状態を調べ、 Si と CaF_2 が明確に相分離しており、副次的な化合物相が形成していないことを確認した。これと透過型電子顕微鏡の観測結果を併

せて、ナノサイズのシリコン量子ドットの存在を確認することが出来た。吸収係数、透過係数の分光特性の測定を行い、量子ドットサイズ・密度との関係を明らかにし、サイズ効果による状態密度低減を実証した。光吸収係数の分光特性を測定することにより、吸収端波長の量子ドットサイズ依存性、および作製プロセス依存性を明らかにし、ドットサイズ 3-4nm に制御することにより、吸収端波長 750-1,100nm@1,000/cm にバンドギャップ制御可能であることを実証し、目標値 800-1,100nm をクリアした。

b) 光生成電流測定

光導電率の波長依存性が測定可能な Si 量子ドットの形成条件および測定条件が明らかになった。量子効率・移動度・寿命時間の積の光波長依存性を求めた。ドットサイズ 3.3nm 試料にて光生成電流の分光感度特性が観測され、中間目標を達成できた。

c) p-i-n 構造形成

クラッキングセルを用いて、CaF₂/Si 量子ドット層と、Si ドーピング層の接合形成と、ドーピング濃度制御に関する基礎データを取得した。その結果、不純物濃度 10¹⁷-10¹⁹/cm³ の範囲で制御するプロセスを明らかにした。セル構造の形成プロセスを設計し、ドーピング制御技術 (10¹⁷-10¹⁹/cm³) を確立できた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

3) ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術 (三洋電機)

<H22 中間目標 : ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜の開発。バンドギャップ制御幅約 0.2eV、欠陥準位密度 5×10¹⁸/cm³ 以下。H26 最終目標 : 単接合セルで変換効率 7%、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm²)。>

a) 高品位マトリクス形成技術の開発

最適マトリクス相形成技術の発掘・選択を行い、マトリクス相薄膜形成技術開発、膜特性の検討などのマトリクス相形成法の探索を行った。ナノドット量子効果発現が可能なマトリクス相の改質技術の開発を行った。湿式法を用いて緻密な薄膜をテクスチャ基板上に形成できることを確認でき、中間目標欠陥準位密度 (<5×10¹⁸/cm²) をほぼクリアできる見通しである。

b) ナノドット粒子配置法の開発、及び、量子効果の検証

ナノ粒子分散に必要な物性、要求事項等の調査研究を行い、ナノ粒子の入手・形成検討を行った。マトリクス相前駆体中へのナノ粒子分散について検討を行い均一分散を達成した。湿式形成マトリクス薄膜中のナノ粒子の分散、PL 発光を確認し、中間目標 (バンドギャップ制御幅約 0.2eV) 達成の見通しである。

c) ナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発

ナノドット分散薄膜の形成が可能となったため中間目標 (Voc ≥ 0.1V) 達成の見通しである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

4) Ge の遷移型制御 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : 歪 Ge 膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー 0.7eV 付近における光吸収係数の 1 桁以上の増大を確認する。H26 最終目標 : 直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率 5% を達成する。>

a) 遷移型制御の理論予測及び最適構造設計

本研究開発の中間目標は「直接遷移型半導体への転換の実証」であり、その目標に対しては、理論計算により、光吸収係数が歪量に依存することを明らかにした。そこで、歪量の最適値の明確化と変換効率向上確認を目標とした。最大変換効率を得られる歪量を明らかにするため、光吸収係数増大を考慮した太陽電池の動作解析を行ない、歪量約 0.5% が太陽電池応用の最適値であることを明確にした。この時、歪 Ge 太陽電池は、無歪 Ge 太陽電池の 1/400 の膜厚で同程度の変換効率を示すことを見出した。

b) 歪 Ge 膜の結晶成長技術の開発

InGaAs 仮想基板を用いて歪 Ge の製膜技術を開発、上記太陽電池応用及び直接遷移転換が可能な歪量 1.55% という世界最高の伸張歪を有する Ge 薄膜の製膜に成功した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 2 (2) 、研究発表・講演 : 6、新

聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：2

5) 薄膜新材料 (岐阜大学、再委託：岐阜工業高等専門学校)

<H22 中間目標：「a)アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発」禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発。それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧 1.0V 以上を達成。「b)ゲストフリーSiGe 系クラスレート薄膜の開発」光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のゲストフリー/希ガス内包 Si クラスレート薄膜を作製。H26 最終目標：「a)アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発」単接合太陽電池にて開放電圧 1.2V 以上を達成。低倍率集光型多接合太陽電池にこれを適用し、真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成。「b)ゲストフリーSiGe 系クラスレート薄膜の開発」ゲストフリー/希ガス内包 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ クラスレート薄膜において、理論値 1.3-2eV をもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅 1.8eV 程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率 5%を達成。>

a)アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発

室温で結晶サイズが数 10nm 程度の微結晶 InGa_N の製膜を可能にした。In ターゲットへの投入電力制御により、In 組成比ならびに光学バンドギャップ制御が可能であることを示し、禁制帯幅 2.2eV 程度の微結晶 InGa_N において光電気伝導度 $6.4 \times 10^{-4}\text{S}/\text{cm}$ (光感度 6.51) を得た。 N_2 ガス分圧比 N_2 を増加することで、膜中の N 組成比を増加させ、光感度を 1.5 から 39.2 に改善できた。また、Ga と In の代わりに GaN、InN ターゲットを使用し、InGa_N の N 組成比を増加させ、窒素欠陥を改善し、禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導度 $1.4 \times 10^{-4}\text{S}/\text{cm}$ (光感度 252) を得た。中間目標値の平成 22 年度中の達成は厳しいと思われるが、最終目標に向け方向性は明確にできた。

b)ゲストフリーSiGe 系クラスレート薄膜の開発 (岐阜工業高等専門学校)

金属内包 II 型 Si クラスレートを高い収率で作製するための条件、クラスレートの前駆体であるジエンチル相 NaSi の熱処理条件を探索した。さらに内包する金属元素を抜くための真空熱処理条件を確立し、II 型 Si クラスレート $\text{Na}_x\text{Si}_{136}$ において Na 含有量を $x=1-2$ まで低減できた。得られた焼結体を押固めた薄膜試料において、光吸収スペクトル (光音響分光法) からダイヤモンド構造の c-Si より大きなバンドギャップエネルギー 1.5eV を有する半導体であることを示した。また、I 型 (金属) と II 型 (半導体) の混合試料で世界初めての光電気伝導度 $\sim 1 \times 10^{-7}\text{S}/\text{cm}$ を観測できた。作成条件の精密化による更なる不純物低減と焼結体熱処理等による欠陥精製を抑制して中間目標 ($2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下) を実現できる見込みである。岐阜工業高等専門学校での希ガスの利用については、希ガス/Si 混合薄膜の合成に成功し、クラスレートに対応する X 線回折ピークを確認できており、ほぼ中間目標を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 38、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

6) ワイド/ナローギャップ材料設計 (龍谷大学)

<H22 中間目標：ワイドバンドギャップ光吸収層材料として $E_g=1.7-2.0\text{eV}$ 、ナローバンドギャップ光吸収層として $E_g=0.6-1.0\text{eV}$ の直接遷移型化合物半導体の組成、結晶構造、結晶配向を設計する。材料設計で得られた特性を実験結果と比較して材料設計の有効性を確認する。この成果を、太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積 1cm^2) を得る。H26 最終目標 : 5-6 接合からなる低倍率集光型化合物系薄膜太陽電池材料 ($0.6-2.0\text{eV}$) の材料設計を行う。材料設計で得られた特性を実験データと比較して材料設計の有効性を確認する。この材料設計を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a) 第一原理計算による材料設計

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ の Sn を Ge や Si に置換した化合物について、第一原理計算を用いて相の安定性と電子構造の評価を行い、太陽電池用光吸収層の材料設計の指針を得た。4 元系化合物半導体 $\text{Cu}_2\text{ZnIVSe}_4$ (IV=Si, Ge, Sn) をワイドギャップ材料候補として見いだした。最適組成にて太陽電池に適用されることにより、中間目標 (真性変換効率 20%) を達成する見通しである。

b) 結晶構造解析

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ の合成プロセスを明らかにし、 $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$ の単一相が得られる領域を決定し、次に X 線リートベルト法で $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$ の結晶構造の解析を行った。 $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$ ($0 \leq x \leq 0.0875$) の結晶構造は Cu/(Zn+Sn) 比の減少とともに、格子定数 a 、 c は小さくなり、 c/a も小さくなることを明らかにした。

c)物性評価

スクリーン印刷/焼結法を用いて CZTSe や CuIn(Se, Te)系固溶体膜を作製し、可視・近赤外吸収スペクトルから禁制帯幅を決定した。CZTSe 膜は 1,100nm 近傍に吸収端を持つ。直接遷移半導体を仮定して、 $h\nu$ に対し $(\alpha h\nu)^2$ をプロットすることで CZTSe の禁制帯幅を求めたところ、1.05eV であった。また、CuIn(Se_{1-x}Te_x)₂ 固溶体の $x=0.5$ で $E_g=0.88\text{eV}$ が得られ、ナローバンドギャップ (0.6-1.0eV) 材料として期待できることを明らかにし、中間目標を達成できた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 30、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 3

7) シリコン系薄膜集光型セル (東京工業大学、再委託 : 奈良先端科学技術大学院大学)

<H22 中間目標 : 低倍率集光で真性変換効率 20% (有効受光面積 1cm²)。H26 最終目標 : 低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm²)。>

a)集光型 Si 薄膜太陽電池の最適設計・試作

アモルファス Si ならびに、微結晶 Si シングル接合セルの集光特性を詳細に検討した。a-Si シングル接合セルの特性は、1sun から集光比を高めていくと、曲線因子が低下する。これは、i 層内の過剰キャリア濃度が増加し、電界分布が変化することと、TCO のシート抵抗による影響が無視できなくなるためである。電界分布の変化に関しては、i 層を薄く設計することにより、改善されることが分かった。シート抵抗については、微細電極を設けることにより改善を図った。以上の結果、数倍集光までは、変換効率が向上することが確認できた。一方、微結晶 Si セルは、もともと開放電圧が低いため、集光に伴う開放電圧増加の効果が大きくなるため、10 倍集光程度まで変換効率が向上すること、また、微結晶 Si セルに対しては、ヘテロ接合構造が効率向上に大きな効果のあることが分かった。2 層タンデムの開発に関しては、中間層を挿入した a-Si/ μ c-Si セルで変換効率 10.1%、a-SiC/a-Si タンデムセルで変換効率 8.8%が得られた。以上の結果、アモルファス Si 太陽電池では、i 層の高注入効果が曲線因子を低下させる現象を見出し、その解決策を明確化でき、微結晶 Si 太陽電池では、低倍率集光で変換効率が大幅にアップすることを世界で初めて見出した。中間目標 (真性変換効率 20%) は達成の見込みである。

b)a-Si:H/CdTe2 接合セルの最適設計・試作

木更津工業高等専門学校で作製した CdTe のガラス基板側に、プラズマ CVD でアモルファス Si を製膜する際、原子状水素等によるネガティブな現象がでないことを実験的に確認した。CdTe 太陽電池のガラス基板にアモルファス Si を堆積させた場合の CdTe セルへの光透過率特性の検討と、オプティカルカップリングの最適設計から、変換効率 9.2%の a-Si セルと、変換効率 15.4%の CdTe 太陽電池で 4 端子タンデム太陽電池を構成すれば、変換効率 15.8%が得られるとのシミュレーション結果を得た。実際の 4 端子デバイスで実証し、シリコン系 2 接合と、CdTe の組み合わせを検討することにより高効率化が可能である。

c)フルスペクトルセル・トモグラフィ解析 (奈良先端科学技術大学院大学)

薄膜素子におけるエレクトロルミネッセンスのスペクトル分光解析により、バンドギャップに対応した波長を有するスペクトルの測定に成功した。薄層構造における電流フローの発光による解析において、エレクトロルミネッセンス強度の空間分布より透明導電膜の抵抗を非破壊で評価する技術を確認した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (0) 、論文 (査読付) : 10 (10) 、研究発表・講演 : 66、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 4

8) 広バンドギャップシリコン系薄膜 (シャープ)

<H22 中間目標 : 広バンドギャップで、光伝導度 $1.0 \times 10^{-6}\text{S/m}$ 以上、新規薄膜評価技術の確立、単接合型薄膜太陽電池で開放電圧 1.2V 以上 (サイズ 1cm² 以上) 、多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率 15%以上。H26 最終目標 : 多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率 17%以上 (サイズ 1cm² 以上) >

a)広バンドギャップ材料の開発

RF、VHF、マイクロ波の広い周波数領域でのプラズマにより、膜成長表面での構造緩和を制御し、広バンドギャップ材料の高品質化を図った。バンドギャップ 2.0eV、光伝導度 $3.9 \times 10^{-6}\text{S/m}$ を達成し、中間目標をクリアした。

b)広バンドギャップセルの開発

開発した広ギャップ材料を活性層に使い、不純物添加層や p/i 界面層の開発により出力電圧の高い薄膜太陽電池を開発した。バンド準位評価技術を確認するとともに、a-SiC 広バンドギャップ

($E_g=1.95\text{eV}$) 材料を用いた単接合セルを作製した。界面制御による高開放電圧化技術を開発し、開放電圧 0.928V (変換効率 5.39%) を達成した。高開放電圧を維持しながら短絡電流の増大化を図ることで中間目標を達成する見込みである。

c) 多接合型薄膜太陽電池の開発

開発した広バンドギャップセルを光入射側セルに応用し、非晶質シリコン、狭バンドギャップセルと組み合わせた多接合薄膜太陽電池設計技術を開発し、高効率化を図った。広バンドギャップセル形成後の非晶質シリコン・微結晶シリコンセルの作製環境を整備した。製膜条件の最適化を実施完了。a-SiC:H 単接合セル変換効率 5.4% ($E_g=1.95\text{eV}$) をベースに今後、多接合型太陽電池にて高効率化を図る。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) サブセル界面接合技術 (三菱電機)

<H22 中間目標 : サブセル界面抵抗 $300\text{m}\Omega\text{cm}^2$ (サブセル界面部電圧降下 0.15V 以下) を得ることを目標とする。H26 最終目標 : サブセル界面抵抗 $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ (サブセル界面部電圧降下 0.05V 以下) を得ることを目標とする。>

a) サブセル界面トンネル伝導評価技術の開発

集光により太陽電池セルに大量の電荷を生成させた条件で、サブセル界面に関わる電気特性を計測し、トンネル伝導に寄与する諸特性を定量的に評価する技術を開発した。雰囲気・温調機構を備えたセル特性評価装置を製作した。微結晶 Si/微結晶 Si セルにおける短絡電流密度および開放電圧は集光に伴う照射強度の増加に比例して向上するのに対し、フィルファクタは逆に低下して効率の制限要素となることを実証した。これを改善するためには、サブセル界面での低抵抗化が不可欠であることを明確化できた。サブセル界面の低抵抗化に重要な役割を果たす再結合準位を定量的に把握するため、その密度・エネルギー分布を静電容量の時間依存性から導出する技術を構築した。サブセル界面の電気特性を評価するためのテストデバイスを考案・試作、サブセル界面抵抗を直接計測する技術を確立した。

b) 低抵抗サブセル界面トンネル伝導構造の開発

サブセル界面の低抵抗化には、n/p 接合における n 型膜伝導帯と p 型膜価電子帯との間のポテンシャル差を小さくすることが有効であることをシミュレーションで検証した。その第一の手法として、n/p 接合界面でのポテンシャル制御によるバンドの曲がりを引き起こす構造を開発。誘電体材料の酸素欠損形成による固定電荷量とポテンシャル変化 (フラットバンドシフト) の関係から、固定電荷形成によるポテンシャル制御を実証した。バンドの曲がりにより、サブセル界面抵抗を低減できる可能性を示し、ポテンシャルの最適制御による低抵抗化を実施中である。第二の手法として、ポテンシャル差が小さい酸化物半導体材料の n/p 接合を挿入する構造を開発した。n 型 ZnO : Al/p 型 NiO : Li 接合構造の挿入により、サブセル界面抵抗 $500\text{m}\Omega\text{cm}^2$ を実証した。今年度中にポテンシャル差が NiO : Li に比べ 0.2eV 小さい Cu_2O 等の p 型酸化物半導体を適用することにより、中間目標値 $300\text{m}\Omega\text{cm}^2$ を達成する見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 6 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

10) カルコパイライト系集光型セル (東京工業大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.1eV の $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 薄膜太陽電池を用いて、低倍率集光時において真性変換効率 20% (単接合、有効受光面積 1cm^2) を得る。 $\text{Ag}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 薄膜太陽電池において開放電圧 0.9V 以上を得る。対向する透明導電膜付きガラス基板上に $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 薄膜太陽電池を貼り合わせ、貼り合わされた状態において変換効率 15% を達成する。貼り合わせによる 2 層タンデム構造の課題を抽出する。H26 最終目標 : メカニカルスタック型 2-3 層タンデム太陽電池において、低倍率集光時において真性変換効率 25% (有効受光面積 1cm^2) を得る。この開発した技術を低倍率集光型フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a) Ag 系ワイドバンドギャップ材料の開発

同時蒸着法と 3 段階法を用いて $\text{Ag}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 薄膜太陽電池を作製、3 段階法により変換効率を 5.31% から 6.03% まで向上させた。 $V_{oc}=0.812\text{V}$ という値を得て中間目標をほぼクリアできた。 1.1eV 集光セルの開発及び 1.4eV 帯カルコパイライト系材料の高品質化を図り、集光下において、CIGS 薄

膜太陽電池の特性を評価、変換効率 20.3%を達成し、中間目標を達成した。Se クラッキング、Ga イオン化、多段階成長法を新規に提案、高 Ga 組成 CIGS 太陽電池作製に向けた技術開発を行った。

b)カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術開発

ITO 同士の貼り合わせに成功し、貼り合わせ時の表面平坦性 (<1nm) が重要であることを明確化できた。タンデム太陽電池作製への目処を確立した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 20、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11)放熱基板カルコパイライト系集光型セル (青山学院大学)

<H22 中間目標 : 放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率 10% (ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm^2 程度) および 20% (ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積 0.5cm^2 程度) を達成する。放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。H26 最終目標 : 放熱基板上のカルコパイライト系集光セルで真性変換効率 25% (単接合、低倍集光、有効受光面積 0.5cm^2) を実現する。この開発した技術をワイドギャップセルと組み合わせて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a)CuInTe 系薄膜形成と太陽電池の試作

Cu-In-Te 系薄膜を同時蒸着法により生成膜およびセル特性の Te フラックス量依存性について検討し、セル作製プロセスの最適化により、非集光で変換効率 5.1% ($V_{oc}=0.335\text{V}$ 、 $J_{sc}=28.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=0.539$) を得た。

b)放熱基板上での CIGS 太陽電池の作製

放熱基板 (Ti) 基板上で CIGS 太陽電池を作製し、1sun 変換効率 17.9%を得た。今後、集光特性を測定するが、中間目標は達成の見通しである。

c)集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討

表面温度上昇を 4°C に抑える冷却機構を明らかにし、最終目標に向けた方向性を見いだした。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

12)構造設計とカルコパイライト系トップセル (立命館大学)

<H22 中間目標 : デバイス構成 (セル数、集光倍率) と各要素セルの仕様 (Eg、 η 、 J_{sc} 、 V_{oc} 、FF、サブバンドギャップの透過率) を明示する。テーマ全体の最終目標達成のためのデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。CIAS 薄膜 (Eg= $1.9\text{--}2.3\text{eV}$) について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率 5%を得る。H26 最終目標 : 変換効率 40%実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。TCO 上での CIAS 薄膜の成長技術開発を行い、CIAS 単接合太陽電池で真性変換効率 10.5%を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a)構造設計

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行った。要素セルの性能が単結晶太陽電池並みである場合に、3 スタックではサブ Eg の透過率が 80%以上、4 スタックでは同透過率が 90%以上の場合に効率 30%以上が達成可能であることを明らかにした。効率 30%達成のための要素セルの性能、サブ Eg の透過率、最適 Eg の組み合わせを明示できたため、本開発項目の目標を達成したといえる。

b)カルコパイライト系トップセル

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップ Cu(In, Al)S₂ (CIAS) 太陽電池の開発を行った。性能目標の変換効率 5%は CuInS₂ で達成したので、平成 22 年度中に CIAS での中間目標の達成を目指している。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 2 (2) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

13) 光学設計技術 (カネカ)

<H22 中間目標：低倍率集光型シリコン系/化合物系多接合薄膜太陽電池において、変換効率 30%を達成するためのオプティカルカップリング構造の提案 (シミュレーションによる光学設計) し、オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計による 3%の変換効率向上を実証する。H26 最終目標：オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a) オプティカルカップリング構造形成技術の開発

短波長光の反射と長波長光の透過に関する波長選択性の高いオプティカルカップリング構造体の設計を行った。さらなる検討により透過・反射光の波長範囲を自由に設計することが可能となった。カップリング構造作製手法の検討によりシミュレーションと同等の選択性を持つカップリング構造体の作製に成功した。オプティカルカップリング構造を有する 4 接合セルの数値計算により、変換効率 30%となるフルスペクトル太陽電池の設計に成功し、中間目標を達成した。

b) 新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発

シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池の一例として、直列並列接続からなるシリコン系、及び化合物系太陽電池構造を提案し、数値計算により 3%の変換効率向上が見込めることを見出した。新規直並列多接合薄膜太陽電池作製に向けて、世界で初めて微結晶シリコンセルと CIS セルの直列タンデム構造の作製に成功した。今年度中にフルスペクトル太陽電池トータルとしての最適化を行い、3%の変換効率向上を実証する。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 4 (1)、論文 (査読付) : 2 (1)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

14) 集光型 CdTe 薄膜 (木更津工業高等専門学校)

<H22 中間目標：直列抵抗 $0.5\Omega\text{cm}^2$ 以下を得る。シリコン系薄膜/CdTe4 端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積 1cm^2) を得る。H26 最終目標：直列抵抗 $0.2\Omega\text{cm}^2$ を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a) 直列抵抗の低減

CdTe 光吸収層の膜質改善としては、CSS 製膜でのソースへの CdCl_2 添加効果を検討し、ソース中の CdCl_2 濃度が 10mol%程度 のとき太陽電池特性が向上することを明らかにした。また、電極作製条件などの最適化を試み、CdTe 膜厚 $5.5\mu\text{m}$ で変換効率 15.2% ($J_{\text{sc}}=26.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $V_{\text{oc}}=0.829\text{V}$ 、 $\text{FF}=0.692$) を達成したが、直列抵抗は $4\Omega\text{cm}^2$ 程度となっており、中間目標の達成は厳しい。

b) 集光型 CdTe 太陽電池の設計・試作

CdTe 太陽電池上に a-Si:H 膜の堆積を行うなどの基礎的検討を行ったが、4 端子タンデム太陽電池の作製に至っていない。今後、中間目標達成に向けて検討を進めるが、現時点において中間目標への CdTe 薄膜の寄与は期待できない。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

15) 表面プラズモン (東京工業大学)

<H22 中間目標：半導体太陽電池における表面プラズモン効果の明確化 (ピーク波長における光電流の 5%向上)。H26 最終目標：表面プラズモンによるピーク波長での光電流の 10%向上、および表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法の提案。>

粒径および分布の異なる表面修飾した金属ナノ粒子を合成し、シリコンウェハ上への金属ナノ粒子薄膜の作製に成功した。作製した銀ナノ粒子複合薄膜は、銀ナノ粒子の局在表面プラズモンに由来する吸収ピークをもち、マトリックスおよび銀ナノ粒子に由来する反射防止効果を示した。単結晶 Si ウェハを用いて Si 太陽電池を作製し、金属ナノ粒子分散有機薄膜の表面塗布によって Si 太陽電池の短絡電流を 9%向上させ、ピーク波長における光電流を 22.3%向上させることに成功した。したがって、中間目標を達成し、さらに最終目標をも大幅に上回る成果を得た (特許出願済み)。Si ウェハの陽極酸化によってポーラスシリコンを形成し、そのナノ多孔体中に金属ナノ粒子を担持することに成功し、表面プラズモンによる大幅な反射率低減にも成功した。更に作製したポーラスシリコンによって太陽電池を作製することで、電場増強効果による効率向上も期待できる (特許出願済み)。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 3 (2)、論文 (査読付) : 7 (7)、研究発表・講演 : 41、新

聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

16) p 型透明導電膜（龍谷大学、共同実施：新潟大学）

<H22 中間目標：基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10\text{S/cm}$ を達成する。p 型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用して p 型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換率 10%を達成する。H26 最終目標：基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10^3\text{S/cm}$ を達成する。開発した p 型透明導電膜を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

a) 新規 p 型 TCO 材料探索と PLD 法による薄膜形成（龍谷大学）

SrCu₂O₂ 系透明導電膜の高性能化について検討した。SrCu₂O₂ の Cu/Sr 比を変えたターゲットを用いてパルスレーザー蒸着（PLD）法により SrCu₂O₂ 薄膜を作製し、その光学特性と電気特性を評価した。また、CuAlO₂ や SrCu₂O₂ とは別の材料系で材料探索と薄膜作製を行った。SrCu₂O₂ や BaCuSeF 薄膜においては目標値を上回る電気伝導性を示す薄膜の作製に成功した。また、新規 p 形 TCO 薄膜の開発にも成功し、最も高い電気伝導率と高い可視光透過率を示した。禁制帯幅 $E_g = 3.1\text{eV}$ （CuAlO₂）、 $E_g = 2.6\text{eV}$ （新材料）、電気伝導率 12S/cm （BaCuSeF）、 21S/cm （新材料）を達成し、中間目標をクリアした。

b) 溶液法とスパッタ法による薄膜形成（新潟大学）

溶液法とスパッタ法を用いて p 型透明導電膜を作製するための基礎技術を確立した。溶液法においては、硝酸金属原料溶液の塗布膜を窒素中熱処理する方法により、p 型 CuAlO₂ 薄膜は 800°C 以上で、p 型 CuYCaO₂ 薄膜は 900°C 以上で作製できることがわかった。また、スパッタ法においては、Ar 希釈酸素ガスと Cu と Al の金属ターゲットを用いた反応性スパッタ法により薄膜を堆積し窒素中 800°C 以上で熱処理することにより p 型 CuAlO₂ 相が出現することがわかった。

<成果発表件数>特許出願（外国）：5（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：19、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：3

17) フルススペクトル TCO（旭硝子）

<H22 中間目標：400-1,400nm で光吸収率 5%以内（浸液法で測定した TCO 基板としての透過率で 87%）、比抵抗 $1 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 以下。この開発した TCO 基板を太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20%（有効受光面積 1cm^2 ）を得る。H26 最終目標：400-2,000nm の波長で光吸収率 5%以内、ヘイズ率 40%以上で比抵抗 $1 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ 以下を達成する。この開発した TCO 基板を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

膜材料と成膜条件を探索して、概ね 1,400nm までの透明性と電気伝導性を両立する薄膜を作製するべく、検討を進めた。平成 22 年度中間目標である透明性・電気伝導性を達成するために、Drude モデルにて必要特性の見積もりを行い、目標値を移動度 $80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上、シート抵抗 $12\Omega/\square$ 以下と設定した。成膜条件を検討することで、移動度 $70\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ は達成することができた。（常圧 CVD での従来の特性は $58\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度）。膜厚方向の移動度分布を検討したところ、部分的には移動度 $80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を達成出来ていることが確認出来た。この膜材料の光吸収率は 8.6%であり、中間目標値には至っていない。平成 22 年度中の目標達成は一部未達になる可能性がある。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

18) グラフェン透明導電膜（富士電機ホールディングス）

<H22 中間目標：導電率 $6 \times 10^3\text{S/cm}$ 以上、透過率 80%以上@380-2,000nm を得る。H26 最終目標：シート抵抗 $10\Omega/\square$ 以下、透過率 90%以上@380-2,000nm を得る。>

a) グラフェン製膜技術の基礎研究

製膜技術として湿式法（化学的剥離）と CVD 法を選定した。湿式法では合成手法の最適化によるシートサイズの向上、CVD 法については追試、及び、より高品質化が見込める MBE 装置による製膜を行うこととした。湿式法で作製したグラフェン膜を用い、膜質評価技術（ラマン分光、XPS、AFM）、透明導電膜特性評価技術（分光光度計、ホール測定）の修得、立上げも併せて行った。

b) グラフェン製膜技術の開発

基礎研究において提案した新規製膜装置を設計・導入し、製膜条件最適化および膜物性と製膜条件の明確化を行った。CVD による成長と任意基板への転写について追試を実施。2 層程度（0.7nm）

での導電率は 20,000S/cm 程度と非常に高い導電率が得られた。この技術を用いて透明導電膜を作製することにより、中間目標を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 8 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 4、展示会出展 : 0

【平成 23～24 年度】(第 2 回中間評価時)

1) シリコン系薄膜集光型セル(東京工業大学、再委託:木更津工業高等専門学校)

<H24 中間目標 : a-SiO₂、a-Si、a-SiGeC、ならびに μ c-Si からなる低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率 20%を達成する。また、上記のシリコン系薄膜太陽電池、ならびに第 4 層、第 5 層セルと組み合わせた 5 接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率 25% (開放電圧 3.72V、短絡電流 9.0mA/cm²、曲線因子 0.75、10 倍程度の集光時)を達成する。H26 最終目標 : 小面積の 5-6 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30% (低倍率集光、有効受光面積 1cm²)を達成する。>

a) シリコン系集光型薄膜太陽電池の最適設計・試作

アモルファス Si シングル接合セル、2 接合タンデムセル、3 接合トリプルセルの集光特性向上を目指し、シミュレーション、材料開発、デバイス物理に至る広い範囲で検討を行った。まず、p 層、n 層、トンネル接合部などに SiO_x を用いた新型高効率タンデム構造を開発した。具体的には、ガラス基板と透明導電膜ならびに透明電導膜と p 層の界面にプラズマ法で形成した SiO_x を挿入することにより、表面反射を抑えることが可能となった。また SiO_x を n 層とセル間中間層、ならびに n 層と裏面反射層を兼用することにより、吸収ロスを抑えることができた。これにより、a-Si/ μ c-Si タンデム太陽電池により、現在までに 13.6%という高効率を得られた。また、a-SiO₂/a-Si/ μ c-Si トリプルセルに代わる新しい構造として、超高ヘイズ ZnO のガラス基板上に高禁制帯幅を有する a-Si/ μ c-Si トリプルセルを開発した。アモルファス Si シングル接合では、集光比とともに変換効率が減少してしまうが、今回、開発した微結晶 Si を 2 層含むトリプル構造では、低倍率集光下でも、曲線因子の低下が見られず、変換効率が大幅にアップ (1sun9.45%、7suns10.7%) することを見出した。

b) 薄膜フルスペクトル太陽電池の試作・評価

アモルファス Si 太陽電池と、CIGS 太陽電池で 4 端子構成のタンデム太陽電池を開発した。メカニカルスタック型 4 端子セルの場合、トップセルとボトムセル間の光学的ロスを低減するため、屈折率が最適値に近いジヨードメタンを使用し、高効率化を図った。その結果、現在までに、変換効率 14.9%が得られた。一方、波長スプリッティング法で、スプリッタ波長が 614nm の場合、約 25%という高い変換効率を得られることが理論解析で明らかになった。スプリッタのカット波長が、これよりも短波長でも長波長でも変換効率は減少する。現在の最適カット波長は、トップセルのアモルファス太陽電池の性能と、ボトムセルの CIGS 太陽電池の性能とのバランスで決まっている。まず市販の波長スプリッタを用いて、太陽電池特性を測定したところ変換効率 18%が得られた。しかし、市販のスプリッタでは、吸収損や反射損の多いことが総合効率を制限していることが分かった。以上の成果をもとに、本グループメンバーで開発した最高性能のパーツを持ち寄り、波長スプリッティング特性を測定した。その結果、スプリッタ波長が 620nm の時、21.8%という変換効率を得られた。アモルファス Si、CIGS それぞれのセル単体では、変換効率はそれぞれ 10%、17%であるが、波長スプリッティングにより、アモルファス Si セルからの寄与が 9.15%、CIGS セルからの寄与が 12.4%となり、総合変換効率 21.8%を達成した(光の強度補正後)。これらの測定成果は、世界初であり、また薄膜系としては世界最高の性能である。ここで、Si 薄膜セルは東京工業大学小長井研究室、CIGS セルは青山学院大学、波長スプリッタはカネカでの試作によるものである。

c) 裏面透明電極作製技術(木更津工業高等専門学校)

1.5eV 程度の禁制帯幅を有する薄膜太陽電池を用いて透明裏面電極の開発を行うことを目的として、龍谷大学で開発している p 型透明導電膜を薄膜太陽電池の裏面電極材料に適用した。龍谷大学と連携し、木更津工業高等専門学校で作製した膜上に、裏面電極として Cu-Nb-O 系薄膜および BaCuSeF 薄膜を製膜して太陽電池を作製した。現在までのところ、Cu-Nb-O 薄膜および BaCuSeF 薄膜を裏面電極に用いたとき、変換効率は非常に低い値となった(変換効率 0.01%程度)。CdTe 層への Cu 拡散を目的として熱処理を行ったところ、太陽電池特性は改善されたがまだ不十分である(Cu-Nb-O : 0.05%程度、BaCuSeF : 0.4%程度)。そこで、Cu ドープカーボン裏面電極形成後の熱処理に替わる、透明裏面電極形成用の Cu ドーピング法を検討した。CdTe 層への Cu 添加方法として、Cu を添加したジエチレングリコールモノブチルエーテル(DEGEBE : C₈H₁₈O₃)を CdCl₂ 処理後の CdTe 層へ適量塗布し、

熱処理を行った。その結果、Cu を添加していない場合（変換効率約 1.8%）と比較して、太陽電池特性が大きく改善した（変換効率約 12.2%）。この結果より、Cu ドープ DEGBE を塗布して熱処理を施すことにより Cu が CdTe 層にドーピングされたと考えられる。透明裏面電極用の CdTe 層へのアクセプタードーピング法として Sb 添加効果を検討した。原料中の Sb 濃度 $10^{18}/\text{cm}^3$ 以下の範囲では Sb 濃度の増加に伴い、太陽電池特性が改善し、変換効率 14.9% ($V_{oc}=0.822\text{V}$ 、 $J_{sc}=26.1\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=0.693$) を達成した。一方、Sb 濃度を $10^{19}/\text{cm}^3$ 以上にすると、変換効率が急激に低下した。C-V 法により、CdTe 層中のアクセプター密度を測定したところ、この手法による Sb 添加によるアクセプター密度の増加は観測されなかった。一方、表面形態を観測したところ、粒径の増大が観測された。粒径の増大などの結晶性の向上より、変換効率が増加したと考えられる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2（1）、論文（査読付）：6（6）、研究発表・講演：37、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出展：1

2) 広バンドギャップシリコン系薄膜（シャープ）

<H24 中間目標：広バンドギャップ i 層を用いた単接合セルにて、開放電圧 1.06V 以上（集光時 1.16V）、短絡電流密度 $9.0\text{mA}/\text{cm}^2$ （有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。H26 最終目標：多接合化したシリコン系多接合セルのトップ層での開放電圧 1.10V（集光時 1.20V）、短絡電流密度 $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$ （有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。小面積の 5 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30%（低倍率集光、有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

a) 広バンドギャップ材料の開発

ワイドバンドギャップ化で急激に導電率が低下する a-SiC:H 膜の膜質改善検討を行った。SIMS 測定と FT-IR 測定の結果から膜中に取り込まれた炭素は Si-CH₃ 結合が支配的となり、炭素濃度が $4 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 以上では急激に導電率が低下することが分かった。プラズマ周波数、水素希釈等の製膜条件では改善できず、i 層のバンドギャップを 1.90eV に固定し、p 層のワイドギャップ化検討を行った。p 層も i 層と同様に膜中の炭素量の増加に伴って Si-CH₃ 結合が増加する。E_g=2.11eV の p 層が得られたが、 $\sigma=1.8 \times 10^{-9}\text{S}/\text{cm}$ と導電率は低い。

b) 広ギャップセルの開発

開発した i 層、p 層を用いたセル試作の結果、E_g=1.90eV の i 層、E_g=2.11eV の p 層にて、短絡電流密度 $11.6\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧 0.996V、曲線因子 0.551、変換効率 6.36% の a-SiC:H セルが得られた。n 層の最適化、TCO/p 界面制御層の導入により、開放電圧 1.06V を達成見込みである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：1、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

3) カルコパイライト系トップセル（立命館大学）

<H24 中間目標：多接合セルのトップセルとして、裏面電極が TCO であるスーパーストレート型 Cu(In,Al)S₂ (CIAS) 太陽電池で、低倍率集光下で変換効率 6% を達成する。H26 最終目標：多接合セルのトップセルとして、裏面電極が TCO であるスーパーストレート型 CIAS 太陽電池で、低倍率集光下で変換効率 8% を達成する。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池の達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップカルコパイライト薄膜太陽電池の開発を行う。光吸収層として CIAS を検討し、禁制帯幅（E_g）としては 1.7-2.0eV 付近を目指し、主に紫外線領域を吸収するセルの実現を目指す。

a) 高品質 CIAS 薄膜の成長と CIAS 太陽電池の作製

Cu、In、Al、S の同時蒸着法によって CIAS 薄膜を $2\mu\text{m}$ 程度、Mo/ガラス基板上に成長させた。Cu、In、Al 源には通常のクヌーセンセルを、S 源にはバルブドセルを用いて蒸気圧の高い S 蒸気を制御した。典型的な基板温度は 550°C であった。Al を添加していない CuInS₂ では数 μm の大きな粒径を持つ柱状の結晶が得られた。光生成キャリアは膜厚方向に走るため、これは太陽電池にとって好ましい結晶成長である。一方で、Al/(In+Al)=0.3 の組成を持つ CIAS では結晶が小粒径化しており、膜厚方向に複数の結晶粒が見られ、結晶サイズとしては $1\mu\text{m}$ 程度となった。Al を添加することによって、結晶成長が阻害された。今後、高品質な CIAS 薄膜を実現するために、従来とは違い、CIAS に相応しい結晶成長法・条件（高温での成長や相制御）を行っていく。次に ITO/ZnO/CdS/CIAS/Mo/ガラス構造の太陽電池を作製した。この構造は、従来の高効率 Cu(In,Ga)Se₂ 太陽電池の構造と同様である。擬似太陽光下における電流-電圧（I-V）特性を測定したところ、E_g=1.7eV で効率 2.0%、さらに Al 濃度を増加させて E_g=2.0eV とすると効率が 1.0% まで低下した。開放端電圧も 0.4V 程度にとど

まった。これは pn 接合が良好でないことと、上述のように CIAS の結晶性が不十分であることが原因と考えられる。

b) ワイドギャップカルコパイライトに適した新型バッファ層の開発

CIAS は $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ や CuInS_2 に対して電子親和力が小さく、伝導帯の位置が高い。つまり、従来の高効率 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 太陽電池で用いられている CdS などのバッファ層は CIAS では最適ではない。伝導帯位置が制御可能で、かつ Cd フリーのバッファとして、ZnO と ZnS の混晶である $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ を開発した。S 比 x を変化させた $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ バッファを CuInS_2 太陽電池に適用し、S 比の最適化を行った。その結果 $x=0.5$ 付近で効率が最大値を示し、比較の CdS バッファを用いたセルよりも高い効率が得られた。今回は、比較的良質な結晶が得られている CuInS_2 を用いて $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ バッファの効果を確認した。一方、CIAS では Al 添加に伴って伝導帯位置が上昇するために、最適な S 比は CuInS_2 に比較して大きな値になると予想される。今後は、CIAS 太陽電池に対する $\text{ZnO}_{1-x}\text{S}_x$ の S 比の最適化を行い、良好な pn 接合を実現する事によって開放端電圧の向上を実現する。

c) 多接合化のためのカルコパイライト薄膜の引き剥がしと界面制御技術の開発

様々な E_g を持つ高効率カルコパイライト太陽電池セルをそれぞれ作製し、引き剥がし技術によって各セルを組み合わせて多接合化できれば、高効率薄膜フルスペクトル太陽電池の実現に大きく貢献できる。フルスペクトル太陽電池に用いられるカルコパイライト材料のうち、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ は良好に引き剥がすことができることを既に確認している。今回は、項目 7) で作製された $\text{Au}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$

(AIGS) 薄膜の引き剥がしを試みた。東京工業大学で AIGS を同時蒸着法で Mo 上に形成し、これを立命館大学にて引き剥がし処理を行った。 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ と比較して、Mo との密着強度は強かったものの、良好な引き剥がしに成功した。ただし、AIGS の成長条件によっては、密着強度が強すぎて引き剥がしができないものもあった。引き剥がしに成功した界面（すなわち、AIGS の裏面側と Mo の表面側）を分析すると、お互いの構成元素に加えて、セレン化物や酸化物が確認された。すなわち、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ の場合と比較して、光吸収層と裏面電極が相互拡散（反応）を起こしているために、密着性が強くなっていると考えられる。また、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ と AIGS では成長条件が異なるために、引き剥がし性に重要な役割を果たす MoSe_2 の結晶配向性が変わっていることも考えられる。今後は、高効率化と引き剥がれ性を両立させる AIGS の成長条件の模索や、引き剥がしセルの作製を行っていく。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：6（6）、研究発表・講演：22、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

4) InGaN 薄膜（岐阜大学）

<H24 中間目標：禁制帯幅 2eV 程度の InGaN 薄膜を用いた単接合太陽電池において 1sun で 1.10V、10suns で 1.20V の開放電圧を達成する。H26 最終目標：InGaN 薄膜を用いた単接合太陽電池において、1sun で 1.18V、10suns で 1.30V の開放電圧を達成する。この InGaN 薄膜を用いた太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

a) 基板温度上昇ならびにポストアニールによる光感度の改善

まず、基板温度の上昇により表面反応を促進させて窒素組成比を増加させることで光感度の改善に取り組んだ。その結果、基板温度を室温から 100°C に上昇することで、N 組成比は 0.73 から 0.93 に増加したが、 100°C 以上では大きな変化はなかった。また、暗電気伝導度と光電気伝導度の比で表される光感度 (σ_p/σ_d) は、基板温度が室温から 200°C まで上昇することで、252 から 1,175 に増加した。これは、再結合センターとして働く欠陥密度が、基板温度の上昇により減少したためと考えられている。しかし、さらに基板温度を上昇すると、逆に光感度は減少した。以上の結果より、基板温度を $100\text{--}200^\circ\text{C}$ 程度に上昇して作製することで、光感度を大きく改善できることが分かった。次に、Asahi-U 基板/p 型 a-SiC/i 型 a-Si:H バッファ層/i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /n 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 構造の太陽電池を、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層を基板温度を室温および 100°C で作製し、その発電特性の変化を調べた。なお、室温および 100°C で作製した i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の光学バンドギャップエネルギーはそれぞれ 2.36eV および 2.45eV 、光感度は 147 および 1,087 であった。また、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層以外の層については同じ作製条件により作製した。その結果、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層を室温で作製した太陽電池試料の発電特性は、変換効率 1.57%、短絡電流密度 $5.85\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧 0.58V、曲線因子 0.46、 100°C で作製した太陽電池試料の発電特性は、変換効率 1.42%、短絡電流密度 $6.58\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧 0.50V、曲線因子 0.44 であった。基板温度の上昇により、短絡電流密度が増加した。また、Asahi-U 基板/p 型 a-SiC/i 型 a-Si:H バッファ層/n 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 構造の試料を作製し、その電流-電圧特性を評価した結果、整流性

を得ることができなかった。以上の結果より、a-Si:H バッファ層を用いた太陽電池で i 型 InGaN が光吸収層として働いており、基板温度上昇による短絡電流密度の増加は、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層の光感度の増加が関係しているものと考えられる。また、ポストアニールにより、室温で作製した $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜の光感度改善も試みた。アニール温度を 200°C に上昇することで、光感度は 16,881 に増加した。しかし、300°C 以上では逆に光感度が減少した。以上の結果から、200°C 程度のポストアニールによっても光感度の大きな改善が可能であることが分かった。

b) 全層ワイドギャップ材料を用いた InGaN 単接合太陽電池

InGaN 太陽電池のトップセルとしての適用を目指し、p 層およびバッファ層にワイドギャップ材料である a-SiO₂ を用いた InGaN 単接合太陽電池を作製し、評価した。なお、太陽電池試料の構造は、Asahi-U 基板/p 型 a-SiO₂/i 型 a-SiO₂ バッファ層/i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /n 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ で、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 作製時の基板温度は室温である。発電特性を評価した結果、整流性は得られたものの、逆方向のリーク電流が大きく、また太陽電池としての動作は確認できなかった。その原因の一つとして、i 型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の欠陥密度が多いため、i 型 a-SiO₂ バッファ層との界面特性が悪いことが考えられた。そこで、ポストアニールによる InGaN 太陽電池の特性改善を試みた。その結果、ポストアニールにより、逆方向のリーク電流を低減することができた。また、変換効率は 0.13%、開放電圧は 0.16V と小さいものの、全層ワイドギャップ材料を用いて作製したトップセル用 InGaN 単接合太陽電池において、初めて太陽電池動作を確認することができた。これは、ポストアニールによる i 層の欠陥密度の減少とバッファ層/i 層界面の特性改善によると考えられる。以上の結果は、更なる i 層の高品質化ならびに界面特性の改善により、トップセル用 InGaN 太陽電池の高効率化の可能性を示していると考えられる。

c) 装置改良と作製条件調整による光感度の改善

InGaN 薄膜の高品質化を図るため、平成 23 年度にスパッタ装置の改良を行った。それに伴って作製条件 (Ar と N₂ ガスの流量) の調整を行った。その結果、光感度 5,780 (暗電気伝導度 9.7×10^{-9} S/cm、光電気伝導度 5.6×10^{-5} S/cm) を示すアモルファス InGaN 薄膜を室温製膜することができた。作製した試料の窒素組成比 In/(Ga+In) が 1.12 であったことから、装置の改良と作製条件の調整により残留ドナーとして働く窒素欠損が減少して暗電気伝導度が増加した結果光感度が向上した可能性が考えられる。以上の結果より、さらに作製条件を調整することで、InGaN 薄膜のさらなる高光感度化が可能であると考えられる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 10、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

5) Si 量子ドット禁制帯幅制御 (東京工業大学)

<H24 中間目標 : TiO₂:Nb を高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリア層として用いた禁制帯幅 1.4eV 程度の Si 系量子ドットシングル接合太陽電池で変換効率 7%を達成する。H26 最終目標 : 量子ドットの禁制帯幅を 1.1-1.5eV の範囲で制御し、禁制帯幅と太陽電池特性の関係を明確にする。Si 系量子ドット系太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

a) 新型透明導電膜 TiO₂:Nb を用いた不純物拡散の抑制

これまでに酸素添加した Si 量子ドット超格子 (Si-QDSL) 構造を発電層とする太陽電池構造を作製し、Si 量子ドット薄膜太陽電池において、開放電圧 518mV、曲線因子 0.51 を達成した。さらなる変換効率の向上には、Si 量子ドット超格子膜を作製する際の高温アニール処理によるドーピング層から Si-QDSL 層への不純物拡散を抑制する必要がある。今回は新しい透明導電膜として注目され、高い熱安定性を有する TiO₂:Nb を採用した。まずは単膜評価として、マグネトロンスパッタ法により作製された TiO₂:Nb 膜を 900°C にてアニール後、TiO₂:Nb 膜の結晶構造と導電率、及び内部透過率の測定を行った。結晶構造はアニール後もアナターゼ型を維持することに成功し、247S/cm という比較的高い導電率を得ることができた。また、内部透過率は可視光領域にてほぼ 90%以上の高い透過率を維持しており、太陽電池動作に影響を与えないことを確認した。続いて、900°Cでのアニール前後の n 型 a-Si/TiO₂:Nb/Si-QDSL 積層膜中の P 濃度を 2 次イオン質量分析法により測定したところ、アニール前後で Si-QDSL 中の P 濃度に変化はなく、拡散が起こっていないことがわかった。このことから、TiO₂:Nb は 900°C という高温下においても高いドーパント拡散抑制効果があることを確認した。

b) TiO₂:Nb を用いた Si ナノドット太陽電池構造の作製

TiO₂:Nb を n++型多結晶 Si 層と Si-QDSL 層の間に挿入した太陽電池構造を作製した。TiO₂:Nb 層の有無による Si 量子ドット太陽電池の I-V 特性を比較すると、TiO₂:Nb 層を導入することで、開放電圧 (328→529mV)、短絡電流 (0.18→1.60mA/cm²)、曲線因子 (0.28→0.46) のすべてのパラメータが向上していることがわかった。これまでに世界最高の変換効率 0.39%を達成した。これは、ドーパ

ント拡散による発電層品質の劣化が抑制されたことが理由として挙げられる。開放電圧はこれまでで最高の 529mV を達成することに成功した。また、短絡電流も 1.60mA/cm² まで向上しており、本プロジェクト初期と比べると、変換効率はおよそ 250 倍まで向上したこととなる。今後は TiO₂:Nb 層のシート抵抗の低減、界面品質及び Si 量子ドット膜の品質の向上を行うことでさらなる変換効率の向上を目指す。また、低倍集光下における Si 量子ドット太陽電池の I-V 特性評価を世界に先駆けて行った。開放電圧は入射光強度の増加とともに急激に上昇していることがわかった。これは、入射光強度が上昇することによって、Si-QDSL 層の欠陥による再結合が抑制されたためであると考えられる。19.7suns の照射時に、開放電圧 649mV を得ることに成功した。曲線因子は Si 量子ドット層内の直列抵抗成分及び n++型多結晶 Si 層のシート抵抗により、集光倍率とともに低下したが、開放電圧の急激な上昇によって、変換効率が向上しており、Si 量子ドット太陽電池の低倍集光下での応用に期待の持てる結果となった。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

6) ナノドット量子効果（パナソニック）

<H24 中間目標：ナノドット密度 30wt%以上、ナノドット量子効果の検証を実施し変換効率 10%（低倍率集光時）を達成する。H26 最終目標：単接合セルで変換効率 11.4%（低倍率集光時）を達成する。また低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm²）を達成する。>

ナノドットとして PbS を用いて、ナノドット分散液の溶媒最適化、ナノドット表面改質等のナノドット分散技術の開発、及び、ナノドットを用いたセルの試作と量子サイズ効果の検証を行った。その結果、以下の成果が得られた。

○塗布プロセス開発によりナノドットの高密度・均一分散を可能にした（ドット密度約 70wt%）。

○ナノドットのサイズ（φ=2.3、3.6、4.6nm）を制御した膜を用いたセルの外部量子効率において、ドットサイズに起因したピーク位置の変化（E_g=0.90-1.40eV に相当）を確認し、ナノドット発電におけるその量子サイズ効果を確認した。

○上記技術を用いてナノドット膜と n 型 a-Si 膜とを積層した独自構造のセルを試作し、V_{oc}=0.71V、J_{sc}=6.3mA/cm²、FF=0.45、変換効率 2.02%を得た。

今回得られた V_{oc}=0.71V は、ウェットプロセスで形成したナノドット層を用いたセルとしては世界最高の値である。これは、ナノドット膜と n 型 a-Si 膜を組み合わせた独自の積層構造により実現できたものである。今後、高 V_{oc} の特徴を生かしたデバイス構造の最適化により変換効率 10%（低倍率集光時）を達成する見込みである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2（1）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

7) カルコパイライト系集光型セル（東京工業大学）

<H24 中間目標：a-Si 太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率 25%を達成する。H26 最終目標：a-Si 太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、さらに歪 Ge 太陽電池を含めたさらなる多接合化により、低倍率集光多接合セルで変換効率 30%を達成する。>

a) バンドギャップ制御技術開発

カルコパイライト系タンデム型太陽電池を実現するために、トップセル材料としてバンドギャップ 1.7eV の Ag(InGa)Se₂ 薄膜太陽電池、ミドルセルとして高 Ga 組成を有するバンドギャップ 1.4eV の Cu(InGa)Se₂ 薄膜太陽電池の開発を行っている。Ag(InGa)Se₂ においては Ag-Se の熔融温度が 616°C と高いため、通常の 3 段階法では Ag が十分に拡散しないことを分析型透過型電子顕微鏡観察により新たに見出した。この時の変換効率は、6%台であった。そこで Ag の拡散を促すため製膜温度の高温化を試みたが、単純に温度を上げたのでは蒸気圧が高い In-Se 系化合物が離脱してしまい、膜組成がずれ、変換効率は向上しないことが明らかとなった。これを解決するため、本研究開発では 2 段階法の最終段階において表面に Ag-Se 層を設け、1 段階目に形成する (InGa)-Se 層をキャッピングする手法を新たに提案した。このキャッピング層の導入により、基板温度 630°C 程度まで膜組成を保ったままで AIGS が形成可能となり、製膜温度の上昇に伴い変換効率が単調に向上し、7.5%台の変換効率が達成された。さらに、この Ag(InGa)Se₂ 薄膜太陽電池を 200°C で空気アニールした結果、変換効率は約 10%（トータル面積）まで向上した。この時の Ag/Ⅲ比は 0.89、Ga/Ⅲは 0.75 である。

注目すべき点は開放電圧であり、約 1V を示している。今後は、曲線因子を向上させ、高効率化を図って行く。高い Ga 組成を有する $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 薄膜太陽電池においては、3 段階法による製膜時における Ga の拡散係数が問題となっている。Ga 組成 30%では、製膜時の In と Ga の拡散係数の違いにより V 字型のバンドプロファイルが自然に設けられ、高い変換効率を有する $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ を製膜することができる。しかし、Ga 組成が 70%程度になると、バンドプロファイルの勾配が大きくなり過ぎ、逆に少数キャリアの収集を妨げてしまう。この解決法として、平成 23 年度に 5 段階法を提案し、変換効率が大きく改善することを見出した。その時の変換効率は、14.9% ($V_{oc}=0.671\text{V}$ 、 $J_{sc}=30.7\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=0.720$) であった。そこで、計算による最適バンドプロファイルの設計、ならびに高温製膜を試みた。その結果、製膜温度 530°C においては Ga が膜上部と下部に偏析し、粒径が小さいものの製膜温度 630°C では $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ の粒成長が進み、また Ga の膜内分布が改善されることを確認した。これにより平均 Ga 組成 70%の CIGS 太陽電池において、変換効率が 4.2%から 10.2% ($V_{oc}=0.770\text{V}$ 、 $J_{sc}=22.7\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 $FF=0.584$) に向上した。高温製膜のセルでは、5 段階法に比べて開放電圧が高いことが特徴であるが、これは膜質の向上を意味すると考えている。

b) タンデム化技術開発

本研究開発では、製膜温度が高いカルコパイライト系太陽電池を用いて、タンデム太陽電池を作製するために、直接貼り合わせ技術を提案してきた。これまでの研究により、透明導電膜同士の貼り合わせに成功している。しかしながら、貼り合わせ前の両面の表面荒さを 1nm 以下にする必要があることと、このための有効な手法である化学機械研磨 (CMP) 法において研磨時の砥粒が表面に残ってしまうなどの問題点があることが確認された。そこで、これらの問題を解決するために、透明導電膜上に a-Si 膜を設けることを試みた。貼り合わせに用いた構造は、ガラス上に ZnO 薄膜を製膜、その上に a-Si を製膜したものである。サンプルは、基板同士に酸素プラズマによる表面活性化を行った後、貼り合わせを行った。透明導電膜である ZnO 同士の接合では、接合界面に間隙が生じ、干渉縞が観測された。しかしながら、a-Si 膜を用いた場合には、このような干渉縞は見られず、強固な接合が形成されていることが分かった。a-Si を用いたことにより、新たな光吸収が生じるが、この貼り合わせ構造の上にはバンドギャップ 1.7eV 程度のトップセルが積層されるため、透明導電膜間に a-Si があっても吸収係数のロスは少ない。貼り合わせ界面の評価として、単にサンプルを対向させた構造と直接貼り合わせにより作製した構造との透過率および反射率の比較を行った。その結果、波長 700nm において透過率は 35.7%から 73.0%、反射率は 61.0%から 23.6%へと向上し、直接貼り合わせにより作製したサンプルの方が、光学特性が優れていることを明らかにした。平成 24 年度は、タンデム化の新たな試みとして波長スプリティングによるタンデム型太陽電池の作製に着手した。その結果、614nm の波長スプリッタを用いて、AIGS および CIGS 太陽電池を用いて変換効率 12.2%を達成した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出席 : 0

8) 歪 Ge (東京工業大学)

<H24 中間目標 : ダブルヘテロ接合型太陽電池を作製し、1.1eV 以下の低エネルギー光照射下において変換効率 1.35% (非集光) を達成する。H26 最終目標 : 直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率 5%を達成する。>

これまでの研究により、InGaAs 仮想基板上への歪 Ge 膜の作製技術を確立した。さらに、フォトルミネッセンス (PL) 法を用いて歪 Ge 膜のバンドギャップ評価を行い、理論から予想されるバンドギャップ縮小効果を初めて観測することに成功した。これらの成果を踏まえ、歪 Ge を用いた太陽電池作製技術の確立をバルク Ge を用いて行った。歪 Ge 膜は、2 軸性伸張歪により直接遷移に対応するバンドギャップが縮小する。これにより膜の吸収係数が増大し、薄膜においても十分な光吸収を得ることができる。しかしながらそれに伴い、開放電圧が減少するという欠点を有する。本研究開発では、光吸収の増大効果と開放電圧の維持を両立させるために、ヘテロ接合型太陽電池を提案している。具体的には、太陽電池の吸収層に p 型の Ge 基板を用い、表面側には n 型と i 型の水素化アモルファスシリコン膜 (a-Si:H) を、裏面側には i 型と p 形の水素化微結晶酸化シリコン膜 ($\mu\text{c-SiO:H}$) を設けることとした。これにより、HIT 構造バルク Ge 太陽電池を作製した。a-Si 及び $\mu\text{c-Si}$ の作製には、プラズマ CVD 法を用いた。用いた Ge 基板は Ga ドープの p 型片面研磨基板であり、抵抗値は 0.005-0.027 Ωcm 、基板厚は 328 μm である。表面側の i 型 a-Si:H と n 型 a-Si:H 層の膜厚は、それぞれ 4nm と 20nm であり、裏面の i 型と p 型 $\mu\text{c-SiO:H}$ 層の膜厚は、それぞれ 5nm と 30nm とした。作製したダブルヘテロ型 Ge 太陽電池に対して光照射下 (AM1.5 、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 、 25°C) での電流-

電圧特性 (I-V 特性) の評価を行った。その結果、開放電圧 213mV、短絡電流 29.9mA/cm²、曲線因子 0.36、変換効率 2.31%のセルの作製に成功した。このセルに関して、他の研究機関と特性を比較した結果、高い開放電圧が得られていることが分かった。これは、HIT 構造を採用した結果である。一方で、短絡電流を比較すると低い結果となっていた。得られたセルの量子効率より、Ge の直接遷移吸収端である 1,560nm 付近での立ち上がりを確認することに成功した。しかし、分光感度特性の最大値が 70%程度であり、また 1,560nm までの長波長領域に向かって量子効率が低下していることが明らかとなった。この分光感度特性は外部量子効率である。そこで、反射率等を加味した内部量子効率を求めた。その結果、波長 700-1,500nm にわたって、80%程度の高い内部量子効率を有していることが分かった。この結果より、高効率 Ge 太陽電池 (歪 Ge 太陽電池) を実現するためには、表面反射率の低減ならびに光閉じ込め構造の導入が必要であり、結晶 Si 系太陽電池で採用されている表面テクスチャ化など、高効率化技術の採用が必要であることが明らかとなった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) 非真空 CuIn(Se, Te)₂ (龍谷大学)

<H24 中間目標 : 第 5 層セル (禁制帯幅 0.85-0.90eV) として変換効率 2% (低倍率集光時)、非真空 CuIn(Se, Te)₂ 太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 25% (有効受光面積 1cm²) を達成する。H26 最終目標 : 第 5 層セル (禁制帯幅 0.85-0.90eV) として変換効率 3% (低倍率集光時)、非真空 CuIn(Se, Te)₂ 太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm²) を達成する。>

a) 印刷/高圧焼結法による CuIn(Se, Te)₂ 膜の作製

メカノケミカルプロセスにより合成した CuIn(Se, Te)₂ (CIST) 微粉末を原料に用いてスクリーン印刷/高圧焼結法で作製した CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 組成の CIST 膜で禁制帯幅 0.87eV を確認した。高圧焼結の条件としては、加圧圧力を 5kN に固定して、焼成温度を 450°C、500°C、550°C、600°C と変化させ、焼成時間は 30 分と一定にした。この X 線回折から焼成温度が高くなるるとともに、CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ の回折ピークが大きくなり、CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 薄膜の結晶性が高くなることがわかった。スクリーン印刷/高圧焼結法で 450°C、500°C、550°C、600°C の各種温度で高圧焼成した CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 膜を 500°C と 550°C で Se+Te 雰囲気中で熱処理した。この熱処理により、膜の組成が CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ から Te が減少して Se が増加することが明らかになった。この組成変化は高圧焼結時の温度が低い CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 膜で著しかった。600°C で加圧焼結した結晶性の良い CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 膜については、500°C や 550°C での熱処理ではほとんど組成が変化しないことを確認した。これらのことから、高い温度で高圧焼成した方が結晶性の良い CIST 膜が得られ、結晶性の良い CIST 膜は後で熱処理を行っても組成変化が起こりにくいことが明らかになった。非真空プロセスで CuIn(Se_{0.5}Te_{0.5})₂ 膜を作製し、禁制帯幅 0.87eV を確認。

b) 印刷/高圧焼結法による Cu₂Sn(S, Se)₃ の合成と薄膜化

薄膜フルスペクトル太陽電池の第 5 層セルに最適な 0.7-0.87eV で禁制帯幅の制御が可能な Cu₂Sn(S, Se)₃ 系新材料を開発した。非真空法による、Cu₂Sn(S, Se)₃ (CTSSe) 系材料を合成し、禁制帯幅を決定し、印刷/高圧焼結法を用いて膜を作製した。Cu₂Sn(S_{1-x}Se_x)₃ 固溶体 (x=0.0-0.6) の拡散反射スペクトルから、Se の固容量が増加するにしたがって吸収端が長波長側にシフトし、Cu₂Sn(S_{1-x}Se_x)₃ 固溶体の禁制帯幅が狭くなることがわかった。そして、Cu₂Sn(S_{1-x}Se_x)₃ の禁制帯幅は Se の固容量が 0.0、0.2、0.4、0.6 と増加するとともに、0.87、0.82、0.76、0.67eV と直線的に減少する。次に、Cu₂Sn(S_{1-x}Se_x)₃ 固溶体の禁制帯幅の組成依存性を参考にして、第 5 層セル (禁制帯幅 0.85-0.90eV) の作製を目的に、Cu_{1.9}Sn(S_{0.8}Se_{0.2})₃ 組成の CTSSe 膜をスクリーン印刷/高圧焼成法を用いて作製した。CTSSe 膜の結晶粒は小さいが、比較的緻密な微構造であった。得られた膜の透過スペクトルから、直接遷移型半導体を仮定して、 $(\alpha h\nu)^2 = h\nu - E_g$ の式を用いて決定した Cu₂Sn(S_{0.8}Se_{0.2})₃ 膜の禁制帯幅は 0.84eV で、拡散反射スペクトルから求めた値 0.82eV とほぼ一致した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 2 (2)、研究発表・講演 : 8、新聞雑誌等への掲載 : 1、展示会への出展 : 0

10) 蒸着 CuInTe₂ 系セル (青山学院大学)

<H24 中間目標 : CuInTe₂ 系ボトムセルで変換効率 2% (低倍率集光) を達成する。H26 最終目標 : CuInTe₂ 系ボトムセルで変換効率 3% (低倍率集光) を達成する。>

a) ナローギャップ CuInTe₂系薄膜形成技術の開発

3 元同時蒸着法により基板温度 250°C および高 Te フラックス下で、単相 CuInTe₂ 薄膜を得た。X 線回折から [112] 優先配向が認められるが、表面平坦性に劣る。今後、製膜条件の最適化により緻密で表面平坦性に優れた CuInTe₂ 薄膜を形成する必要がある。また、光学的に求めた禁制帯幅は 0.97-0.98eV であり、CuInSe₂ 薄膜より禁制帯幅が狭いことを確認した。

b) CuInTe₂系薄膜太陽電池の試作と特性評価

製膜条件を最適化した CuInTe₂ 薄膜を用いた太陽電池の作製とセル特性の評価を実施した。a) の CuInTe₂ 薄膜を用いて ZnO:Al/ZnO/CdS/CuInTe₂/Mo/SLG 構造を有する太陽電池を試作した結果、変換効率 0.33% (Voc=85.1mV、Jsc=13.8mA/cm²、FF=0.277) となった。しかしながら、このセルの CuInTe₂ 薄膜に KCN 処理 (10wt%、1min) をした結果、変換効率は 1.1% (Voc=154mV、Jsc=23.2mA/cm²、FF=0.295) に改善した。したがって、化学量論的組成の CuInTe₂ 薄膜内に、前述の XRD や Raman 分光では検出できなかった微量の Cu_{2-x}Te 相が混在していると推測される。実際に、Cu/In=0.84 の CuInTe₂ 薄膜セルでは KCN 処理なしで変換効率 2.1% (Voc=221mV、Jsc=20.6mA/cm²、FF=0.462) が得られた。このセルを暗室 (20-25°C、25-30%RH) にて 5 ヶ月間保管後、Voc と FF の改善により変換効率 3.5% (Voc=324mV、Jsc=19.2mA/cm²、FF=0.561) まで向上した。セル特性改善の理由として酸素による CuInTe₂ 光吸収層内の電気的に活性な欠陥 (VTe) のパッシベーションや混在する Cu_{2-x}Te 相によるシャント・パスの低減により、漏れ電流が低減したためと考えられる。今後、更なる高効率化のためには CuInTe₂ 薄膜層の高品質化が必要である。

c) 低倍率集光下における CuInTe₂ 薄膜太陽電池の特性評価

集光型ソーラーシミュレータを用いて 10 倍集光までセル特性の測定・評価をした。集光倍率の増大に伴い、Voc が向上し FF が単調に低下した。その結果、5-10 倍集光で変換効率が最大 4.4% (7 倍集光) となった。本実験に用いたセルでは、暗時 J-V 特性から求めた n 値は 1.9 であったので、5 倍集光で 31mV、10 倍集光で 49mV 程度だけ Voc が理論値より低くなった。この原因として、ナローギャップ・セルの冷却不足が挙げられ、今後放熱性の良い金属基板上にセルを作製することで、Voc の損失を改善できる。また、高い集光度における FF の低下は CuInTe₂ 層の膜質改善と TCO 層の低抵抗化および Al グリッド電極の設計の見直しにより改善できると考えられる。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11) p 型透明導電膜 (龍谷大学、共同実施 : 新潟大学)

<H24 中間目標 : 基本特性として Eg>3.0eV、σ>300S/cm を達成する。p 型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用して p 型透明導電膜の有効性を確認し、従来の SnO₂ や ZnO よりも開放電圧 50mV 以上の増加を目指す。また、p 型透明導電膜を CIGS 太陽電池等の下部電極として適用し、従来用いていた電極と同等の特性を達成する。H26 最終目標 : 基本特性として Eg>3.0eV、σ>10³S/cm を達成する。>

a) PLD 法による p 型透明導電膜の作製技術開発

○PLD 法による Cu-Nb-O 系 p 型 TCO 膜 (Eg=2.6eV の Cu-Nb-O 系薄膜) で、可視光透過率 70%、116S/cm を達成した。しかし、基板温度 500°C で Cu-Nb-O 膜を CIS 太陽電池や CdTe 太陽電池の裏面電極として形成したのでは、CdS バッファ層と CIGS 層の界面や CdS 層と CdTe 層の界面で拡散が起こり、太陽電池特性を劣化させてしまう。そのため、CIS 太陽電池や CdTe 太陽電池への応用を目指して PLD 法で Cu-Nb-O 膜の形成時の基板温度の低温化に取り組んだ。基板温度 300°C で形成した Cu-Nb-O 膜の熱処理前には平均可視光透過率約 10%、電気伝導率 1.39×10⁻¹S/cm と特性は非常に低かったが、N₂ 雰囲気 で 2h 熱処理することにより平均可視光透過率約 26% まで向上したが、電気伝導率は 1.10×10⁻¹S/cm でほとんど変化しなかった。しかし、熱処理温度を 350°C まで高くしたところ、平均可視光透過率 58%、電気伝導率=8.75S/cm まで向上した。

○PLD 法による NiO 膜 (Eg=3.6eV の NiO 薄膜) の作製で可視光透過率 74%、10⁴S/cm を達成した。ホウケイ酸ガラスを基板に用いて、基板温度を 500°C に設定した。導入ガスとチャンバー内の圧力を変化させて次の 3 種類の NiO 膜を作製した。i) 導入ガス O₂、チャンバー内の圧力 1.0mTorr、ii) 導入ガス 20%O₂-80%N₂、チャンバー内の圧力 1.0mTorr、iii) 導入ガス 20%O₂-80%N₂、チャンバー内の圧力 0.1mTorr である。膜の厚さは i) 260nm、ii) 205nm、iii) 90nm であった。いずれの条件で形成した膜も X 線回折により NiO の [111] 回折が観察され、NiO が結晶化していることが確認出来た。いずれの NiO 膜も可視光領域で 60% 以上の透過率を示し、禁制帯幅はすべて 3.6eV と大きく p 型 TCO として十分に大きな値であった。いずれの膜も p 型の電気伝導性を示したが、i) および ii) の NiO 膜は

電気伝導率は非常に低かった。それに対して、ハ)の NiO 膜の電気伝導率は高く、 10^4S/cm を示した。
○PLD 法による NiO 系新材料膜 ($E_g=3.6\text{eV}$ の NiO 系新材料) の作製で 59%の可視光透過率と 180S/cm の電気伝導率を達成した。ホウケイ酸ガラスを基板に用いて、基板温度を 500°C に設定した。導入ガス $20\%\text{O}_2\text{-}80\%\text{N}_2$ 、チャンバー内の圧力 1.0mTorr で膜を作製した。得られた膜は NiO 膜と類似の X 線回折を示した。

○BaCuSeF 等の p 型 TCO を化合物系太陽電池の裏面電極に適応し、太陽電池特性を確認した。ワイドギャップ薄膜シリコン太陽電池の表面電極や、CdTe 太陽電池や CIS 太陽電池の裏面電極への応用を目指して、東京工業大学や木更津工業高等専門学校、立命館大学と共同して p 型透明導電膜の太陽電池への適用について検討を行った。その中で、CdTe 太陽電池の裏面電極として BaCuSeF 系 p 型 TCO を適用したところ太陽電池特性を確認し、CIS 太陽電池の裏面電極として BaCuSeF 膜を適用したところダイオード特性を確認した。

b) 溶液法及び反応性スパッタ法による p 型透明導電膜の作製技術開発 (新潟大学)

PLD 法による Cu-Nb-O 系薄膜の p 型高導電性の成果に引き続き着目し、Ar 希釈酸素ガス中で Cu と Nb のターゲットを交互に堆積する対向ターゲット式反応性スパッタ法において、堆積時間比及び周期や酸素濃度などを変化させて薄膜の作製・評価を行った。銅系酸化物系の p 型導電性では、 0^2 の 2p 軌道への Cu^+ の 3d 軌道の混成が正孔局在化緩和に重要と解釈されていることを踏まえて、基礎的実験として Cu のみのスパッタによる薄膜を基板非加熱条件で作製したところ、その X 線回折パターンは低酸素ガス濃度では Cu^+ 酸化物 Cu_2O のピークのみだったが、高酸素ガス濃度では Cu^{2+} 酸化物の CuO のピークも出現した。また、低酸素ガス濃度で Nb のみのスパッタによる薄膜では、組成が Nb_2O_5 に対応していたものの X 線回折ピークは観られなかった。これらの結果を踏まえ、低酸素ガス濃度で Cu-Nb-O 薄膜作製を行った。大気圧下窒素雰囲気 400°C の熱処理も行った。薄膜の作製条件及び熱処理の有無に依らず、X 線回折パターンでは特徴的ピークが観られず、アモルファスもしくは微結晶構造とみなせる。Cu/Nb 比は、PLD 法で p 型導電性が報告されている範囲 (約 0.3-1.7) にほぼ対応している。また、Cu/Nb 比増加と共に $\text{Cu}_2\text{O-CuNbO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 擬混晶組成線よりもやや酸素欠損になると共に、熱処理による酸素含有比の減少傾向が観られる。薄膜がホットプローブ法で p 型を示したことは、薄膜の組成が Cu^{2+} を含む $\text{CuO-Cu}_3\text{Nb}_2\text{O}_8\text{-CuNb}_2\text{O}_6\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 擬混晶系組成線よりも Cu^+ を含む $\text{Cu}_2\text{O-CuNbO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$ 擬混晶系組成線に近いことに矛盾しない。低導電性を有していたことは、 Cu^+ の擬混晶系組成線よりもやや酸素欠損であったことから、酸素空孔ドナーの補償効果の可能性も考えられる。熱処理前の透過率では、Cu/Nb 比の増加に伴った吸収端の長波長シフト及び透過率減少傾向が生じていた。なお、熱処理による透過率スペクトルの変化がほとんどなかったことは、熱処理による Cu/Nb 比の変化が小さかったことに対応しているようにみえる。堆積及び熱処理条件に対する薄膜の組成制御性の向上を図ると共に、電気的特性の組成依存性の明確化が必要であることがわかった。これまでの溶液法による CuAlO_2 薄膜および CuYO_2 薄膜などの作製評価データを基に、酢酸金属原料を用いたスピコート法により NiO 薄膜を作製し、Cu 不純物添加による p 型導電性制御を試みた。石英基板上に酢酸金属水溶液をスピコートし、空気中での加熱処理を施して、無添加および Cu 添加薄膜を作製した。薄膜の組成は、やや酸素過剰であったものの、その金属組成比は原料溶液中の金属組成比にほぼ対応していた。この薄膜の X 線回折結果から、低 Cu 濃度では NiO のみであるが、高 Cu 原料濃度では CuO も出現することを確認した。作製した薄膜の透過率スペクトルにおける吸収端は、報告されている NiO の光学バンドギャップにほぼ対応している。また、Cu 原料濃度増加に伴う透過率減少の傾向は、 CuO 相出現に関連していると考えられる。薄膜はホットプローブ法で p 型伝導を示し、Cu 添加により導電率が 10^{-4}S/cm から 10^{-3}S/cm へ増加した。これは、Ni 空孔または格子間 0 のアクセプター真性欠陥の可能性に加えて、Ni サイト置換 Cu アクセプターの可能性を示唆している。組成比および不純物添加条件等の最適化による高導電化が期待される。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 16、新聞雑誌等への掲載 : 0、展示会への出展 : 1

12) フルスペクトル TCO (旭硝子)

<H24 中間目標 : $400\text{-}2,000\text{nm}$ の波長での平均光吸収率が 7%以内、波長 $1,000\text{nm}$ でヘイズ率 80%以上、波長 $1,200\text{nm}$ でヘイズ率 60%以上、抵抗率 $1\times 10^{-3}\Omega\text{cm}$ 以下を達成する。H26 最終目標 : $400\text{-}2,000\text{nm}$ の波長での平均光吸収率が 5%以内、波長 $1,000\text{nm}$ でヘイズ率 80%以上、波長 $1,200\text{nm}$ でヘイズ率 60%以上、比抵抗 $1\times 10^{-3}\Omega\text{cm}$ 以下を達成する。この開発した TCO 基板を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm^2) を達成する。>

a) 必要な移動度、キャリア濃度の明確化

これまでの検討により、移動度が $70\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超える $\text{SnO}_2:\text{F}$ 膜を作成することが出来るようになった。目標の光吸収率を達成するために必要な移動度、キャリア濃度を算出するために、様々な膜厚 ($0.8\text{--}3.2\ \mu\text{m}$)、キャリア濃度を持つサンプルの光吸収率とキャリア濃度の関係を調べた。その結果、波長 $1,000\text{nm}$ 以上の近赤外の波長域の吸収率、波長 $400\text{--}2,000\text{nm}$ の平均吸収率が、単位面積当たりのキャリア濃度 (シートキャリア濃度と呼ぶ) に比例していることが分かった。これは Drude モデルから理解できる挙動である。シートキャリア濃度対平均吸収率 (波長 $400\text{--}2,000\text{nm}$) を直線でフィッティングし、 $400\text{--}2,000\text{nm}$ の平均吸収率を 7%以下にするためにはシートキャリア濃度を $7.8\times 10^{15}/\text{cm}^2$ 以下にする必要があることが明確になった。また、光吸収率の膜厚依存性はほとんど無いことも分かった。目標には抵抗率 $1\times 10^{-3}\ \Omega\text{cm}$ 以下という項目も挙げられている。しかし本研究開発で開発した TCO では、シートキャリア濃度が光吸収率を決めていて膜厚には依存していないという結果から、抵抗率は目標値には適していないことが分かった。なぜならば例えば膜厚が 500nm と $1,000\text{nm}$ の TCO があり、それらが同じシートキャリア濃度と移動度を持っていれば、光吸収率、シート抵抗ともに等しいので、TCO の性能としては同等になる。しかし膜厚が 2 倍なので抵抗率も 2 倍となってしまうため、抵抗率は TCO の性能を示す指標としては不十分だと考えられる。そこで本研究開発ではシート抵抗 $12\ \Omega/\square$ 以下という項目を目標値に加えて開発を行った。なお、前述したシートキャリア濃度 $7.8\times 10^{15}/\text{cm}^2$ 以下、シート抵抗 $12\ \Omega/\square$ 以下を満たすためには、移動度 $69\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上が必要であることが計算できる。

b) RIE 基板上高移動度・低キャリア濃度膜の開発

前述の通り移動度 $70\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を超える $\text{SnO}_2:\text{F}$ 膜は出来ているが、波長 $1,000\text{nm}$ でのヘイズ率が 1% 程度と、目標の 80% に比べ大幅に低いことが分かっている。そこで高ヘイズ率化のためにガラス基板を Reactive Ion Etching (RIE) 処理することで表面を凹凸にし、ヘイズ率を上げることを検討した。膜厚約 900nm の $\text{SnO}_2:\text{F}$ 膜を RIE 基板上に作成すると、30 分以上の RIE 処理によりヘイズ率は目標値にほぼ到達することが分かった。しかし移動度は平坦基板 (RIE 時間 0) では $70\text{--}80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の高い値を示すが、RIE 基板上では $35\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度に低下することが分かった。RIE 基板上での移動度を向上させるために厚膜化することを考えた。実験の結果、厚膜化により移動度は向上する事がわかったが、膜厚に比例してシートキャリア濃度も増加するため a) で求めたシートキャリア濃度 $7.8\times 10^{15}/\text{cm}^2$ 以下を満たせなかった。そこで、シートキャリア濃度を増加させずに厚膜化するために、ノンドーブ層の上にドーブ層を積層する構成の検討を行った。その結果、ノンドーブ層 $2.7\ \mu\text{m}$ 、ドーブ層 500nm とすることで、シートキャリア濃度は一定に保ったまま移動度を $79.8\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に改善することができた。

c) 開発品の特性

前述の RIE 基板とノンドーブ層の上にドーブ層を積層する構成 (以下開発品イ) と呼ぶ) によって、高移動度・低シートキャリア濃度 (高透過率) を保ったまま、ヘイズ率を向上させることに成功した。また、平坦な基板の上にノンドーブ・ドーブ層を積層する構成 (以下開発品ロ) と呼ぶ) や、平坦な基板の上にドーブ層のみを成膜する構成 (以下開発品ハ) と呼ぶ) によって、電気特性・透過率は同等に保ったままヘイズ率のみを大幅に変えることが出来るようになったので、その特性を記載する。各波長でのヘイズ率は開発品イ) で 94.8%、76.5%、65.3% (波長 550nm 、 $1,000\text{nm}$ 、 $1,200\text{nm}$ 。以下同様。)、開発品ロ) で 38.5%、7.9%、4.0%、開発品ハ) で 5.3%、0.6%、0.2% である。なお Asahi-U のヘイズ率は 17.9%、1.9%、1.0% である。また、開発品イ)、ロ)、ハ) の表面を SEM 観察したところ、テクスチャ周期が開発品イ) の $2\ \mu\text{m}$ 程度から開発品ハ) の 200nm 程度まで大きく変化していることが分かった。上記のように透過率・電気特性は一定に保ったまま、ヘイズ率、テクスチャサイズを大幅に変化させることが出来るようになったので、今後これらの TCO を用いて薄膜シリコン太陽電池の高効率化を検討する。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

13) グラフェン透明導電膜 (富士電機)

<H24 中間目標 : シート抵抗 $30\ \Omega/\square$ 以下、透過率 90% 以上 @ $380\text{--}2,000\text{nm}$ のグラフェン薄膜を得る。また、ITO などの n 型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧が 50mV 以上増加することを目標とする。H26 最終目標 : シート抵抗 $10\ \Omega/\square$ 以下、透過率 90% 以上 @ $380\text{--}2,000\text{nm}$ の透明導電膜を開発すること。>

a) はじめに

平成 22 年度終了時点で得られているグラフェンのシート抵抗は $250 \Omega/\square@90\%$ であった。目標の $30 \Omega/\square@90\%$ を達成するためにはグラフェンの移動度とキャリア密度を向上させることが必須となる。グラフェンの移動度を向上するためには膜質はもちろんであるが転写プロセスでのダメージを排除しなければ、折角膜質が高いグラフェンを製膜したとしても結局特性は低下してしまう。そこで、まず転写プロセスでのダメージ対策を行った。具体的には基板をエッチングする際に付着する残渣の除去、および、基板を選ばず、剥離、亀裂無く均一に転写する手法の開発を行った。

b) 残渣除去プロセスの開発

平成 23 年度の実験結果より、作製したグラフェンの表面にはエッチングの際の残渣などが付着していることが分かった。表面のみの材料であるグラフェンにとって、このような付着物はキャリアの移動を妨げることとなり、移動度が低下するとともにシート抵抗が増加する原因となる。エッチング中の主要な付着物としては金属イオンの析出などによる微粒子が考えられるため、今回エッチングに使用するエッチャントの違いによる付着物の評価を実施した。エッチャントとしては鉄系の $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 FeCl_3 、および酸系の $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ を用いた。付着物の評価は TEM により行い、サンプルはグラフェンを TEM 測定用の Cu グリッドに転写し、水素雰囲気中にて 300°C 、1h 加熱することで PMMA の残渣を完全に燃焼させたものである。なお、TEM の加速電圧は 80kV である。TEM による評価を行った結果、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ にてエッチングした場合、グラフェンの表面には微粒子が付着しており、TEM-EDX 組成分析より、鉄と銅の微粒子であることが分かった。また、 FeCl_3 を用いた場合においても、細長い形状の鉄微粒子と、球状の銅微粒子が観測された。これに対して、 $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ を用いた場合には、銅微粒子のみが観測された。これらの結果から、鉄微粒子の原因は鉄系エッチャント中に含まれる鉄イオンの析出であることが分かった。また、銅微粒子については、Mo グリッドを用いた TEM 測定では観測されていないことから、TEM 測定において用いた Cu グリッドが汚染源であると考えられる（水素アニールの際に Cu グリッドの表面の酸化銅が還元され、銅微粒子となりグラフェンに付着したと考えられる）。以上の結果より、酸系のエッチャントである $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ を用いることで、グラフェンへの表面の汚染を最小限に抑えたエッチング技術の開発に成功した。

c) 転写技術の高度化

CVD と転写によって作製したグラフェンの移動度は、転写前 (PMMA 上) では $500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度であるのに対し、任意の基板に転写すると $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度に低下してしまう。この主な原因は基板への転写の際に発生するグラフェンの剥離、亀裂である。これは、グラフェン/PMMA を基板に圧着する際の PMMA の変形や、グラフェンと PMMA の熱膨張係数の違いなどにより発生すると考えられる。そこで、PMMA の厚さを $1\mu\text{m}$ 以下 (従来は数 $10\mu\text{m}$) とし、PMMA を軟化させることでグラフェンを基板にマイルドに付着させて、剥離、亀裂の低減を行った。転写の手順としては CMP 研磨した Cu ホイル上に CVD にてグラフェンを成長し、その上に 10wt% (クロロベンゼンにて希釈) の PMMA を $20\mu\text{L}$ 塗布した後、 $4,000\text{rpm}$ 、 30sec の条件でスピコート、 40°C 、 30min 乾燥させることで $1\mu\text{m}$ 以下の PMMA を形成した (従来は塗布を行い、乾燥させるのみであった)。その後、Cu ホイルを $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ を用いてエッチングし、超純水にて数回洗浄、乾燥することによりグラフェン/PMMA サンプルを形成した。このサンプルを所望の基板上に配置し、加熱炉にて 180°C 、 30min の条件で加熱する。このとき、PMMA のガラス転移温度が 106°C であるため、PMMA が軟化し、グラフェンを基板の形状に沿って付着させることができる。その後、PMMA をアセトンで取り除き、超純水で洗浄した。最後に水素雰囲気中にて 300°C 、1h 加熱し、PMMA の残渣を完全に燃焼させた。上記手法を用いて、 SiO_2/Si 、石英、PET 各基板 (10mm 角) 上にグラフェン (5mm 角) を転写した結果、各基板においてサンプル全面 (5mm 角) で剥離がほとんど無く、さらに、 $1,000$ 倍では亀裂が観測されず、完璧な転写を実現することに成功した。次に、この転写したグラフェンの電気伝導特性の評価を行った結果、各基板上の移動度は $1,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度と基板による顕著な差は見られず、以前よりも大幅な移動度の向上が見られた。また、シート抵抗は $480\text{--}800 \Omega/\square$ 程度であり、サンプル毎でのキャリア濃度のバラツキがあるためシート抵抗にもバラツキが生じている。なお、このシート抵抗の値は単層グラフェンのものであり、透明導電膜に適用する際には透過率 90% が見込める 4 層程度を積層する。したがって、現状では 4 層積層で換算すると $141 \Omega/\square@90\%$ が得られている事となる。以上より、転写後のグラフェンの移動度はミリメートルオーダーのサンプルとしては先行研究と同等程度の値が得られている。このような高度な転写が実現されて初めて太陽電池への転写が可能となる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 4 (3)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 0

14) サブセル界面接合技術（三菱電機）

<H24 中間目標：サブセル界面抵抗として $200\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ ）を得る。更に、この開発した技術を太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（ ~ 50 倍）時の曲線因子 0.75 以上を実現する。H26 最終目標：サブセル界面抵抗として $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度 $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ ）を得る。更に、この開発した技術を太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（ ~ 50 倍）時の曲線因子 0.78 以上を実現する。>

a) サブセル界面評価技術の開発

サブセル界面抵抗計測技術およびイオン化ポテンシャル・フェルミ準位評価技術を駆使することにより、各接合界面での抵抗の発生原因を明らかにし、これに基づいた接合層形成プロセスの改善を行った。また、サブセル界面抵抗の低減に伴い、タンデムセルの曲線因子が増加することを実証した。更に、サブセル界面抵抗以外の表面透明電極や発電層等に関わる抵抗成分を定量化、これら抵抗成分の低減が曲線因子目標の実現に不可欠であることを明らかにした。

b) 低抵抗サブセル界面構造の開発

p/n 接合における p 型膜価電子帯と n 型膜伝導帯との間のポテンシャル差の縮小によりサブセル界面抵抗を低減する方針に基づき、透明導電膜（TCO）の p/n 接合を挿入する構造の開発を進めた。

1) TCO-p/n 接合抵抗低減

p-TCO と n-TCO の導電性を発現させるためには、それぞれ酸素過剰および酸素欠乏の状態が必要となる。それに対し TCO-p/n 界面接合構造においては、p-TCO を酸素過剰で形成する製膜プロセスが先に形成した下地の n-TCO の欠乏酸素を減少させるため、TCO-p/n 界面にキャリアの空乏層が発生、接合抵抗が増加してしまう。そこで、上記現象を回避するため n-TCO として酸化の影響を受けにくい InZnO を、p-TCO として NiO:Li を用い、酸化抑制雰囲気スパッタで製膜して抵抗低減と光透過率向上を両立した。上記アプローチにより、接合抵抗 $80\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度 $0\sim 0.5\text{A}/\text{cm}^2$ でほぼ一定）を実現した。これは中間目標からさらに進んで最終目標である $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下を達成したことになる。

2) TCO-p/n 接合層のタンデムセル曲線因子に与える効果

a-Si セル/ $\mu\text{c-Si}$ セルのタンデムセルに上記サブセル界面構造を適用し、接合抵抗が低いほど低倍率集光による曲線因子の低下が抑制されることを明らかにした。現状、低倍率集光（5 倍）時の曲線因子として 0.72 が得られており、今後、接合層の改善、セル間での電流バランスの最適化、セル全体の直列抵抗の低減を実施し、中間目標の集光時の曲線因子として 0.75 以上を達成できる見込みである。

<成果発表件数> 特許出願（外国）：4（1）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

15) 光学設計技術（カネカ）

<H24 中間目標：低倍率集光系 Si 系/化合物系多接合薄膜太陽電池において、シミュレーション技術により、中心機関で選択された 5 接合太陽電池の組み合わせに最適な光学制御構造を設計する。さらに、設計した光学制御構造を作製しオプティカルカップリング構造の効果を確認する。オプティカルスプリッタを開発し、光学的損失 8%以下、カット波長が 800-1,000nm の範囲で任意に変更できることを確認する。直並列 3 接合素子構造を実現し、通常の直列 3 接合と比較した効率の向上を確認する。H26 最終目標：オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm^2 ）を達成する。>

オプティカルスプリッティング構造形成技術の開発に関して、以下の成果を得た。

- 光学シミュレーション技術として、所望の波長における光の透過・反射量を計算し、ターゲットとする光学特性を達成するための多層膜構造を最適化するためのソフトウェアを導入し、斜入射条件におけるオプティカルスプリッタの最適設計を実施・検証する事を可能とした。
- 導入したソフトウェアによりオプティカルスプリッタの構造を検討し、任意の波長で透過反射が分離でき、かつ広い範囲にわたって 90%以上の透過・反射特性を維持した光学ロスが少ないスプリッタを設計する事ができた。
- 設計したオプティカルスプリッティング構造を光学薄膜作製技術により作製し、作製したスプリッタが設計した特性と同等の光学特性（透過・反射率の角度特性を含む）を有することを確認し、本研究開発で確立した技術が薄膜フルスペクトル太陽電池のスプリッタの作製に適用可能であることを確認した。

○作製したオプティカルスプリッタを用いて、トップセルにアモルファスシリコン太陽電池、ボトムセルにヘテロジャンクション太陽電池を用いたオールシリコン系擬似薄膜フルスペクトル太陽電池構造を世界で初めて作製し、オールシリコン太陽電池では従来想定していたよりも短波長側で波長分離をする事でトータルの変換効率が向上する効果があることを見出し、最終的に単セルでの測定よりも絶対値で 1%高い変換効率である 21.9%の変換効率がトータルで得られることを確認した。

○中心機関が必要とする光学特性（スプリット波長）を有するオプティカルスプリッタを作製し、提供することで中心機関の変換効率向上の成果達成に寄与する事ができた。

さらに、新規の直並列構造薄膜フルスペクトル太陽電池構造を作成する事に成功し、世界で初めてのコンセプトを有する新たな多接合太陽電池を実デバイスとして実現する事ができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

16) 表面プラズモン（東京工業大学）

<H24 中間目標：特定の波長に対して反射・透過する金属ナノ粒子膜を、a-SiO/a-Si/ μ c-Si トリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、 μ c-Si ボトムセルからの光電流を $2\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上向上させる。H26 最終目標：特定の波長に対して反射・透過する金属ナノ粒子膜を、a-SiO/a-Si/ μ c-Si トリプル接合セルの裏面反射膜等として作製し、トリプル接合セルの短絡電流密度 $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$ 以上を達成する。>

局在表面プラズモンは、金属ナノ粒子に光が入射した際に励起される自由電子の集団振動である。局在表面プラズモン効果として入射光の散乱効果、局所電場増強効果などが挙げられる。本研究開発では、金属ナノ粒子の局在表面プラズモン効果による太陽電池の変換効率向上に取り組んでいる。薄膜シリコン系太陽電池利用の裏面反射膜として利用される銀反射薄膜は、波長 900nm 以上の光はほぼ 100%反射するが、それ以下の波長の反射率は低い。一方、金属ナノ粒子は特定波長の光を反射する性質を持っている。本研究開発では、金属ナノ粒子膜の局在表面プラズモン効果による、光トラッピングを含む反射と透過の光の制御によって、薄膜フルスペクトル太陽電池の各セル間の電流マッチングを向上させ、変換効率を向上させることを目的としている。

a) 有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製

耐熱性の向上のために有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製をおこなった。液相還元法により作製した銀ナノ粒子（AgNP）を tert-ブチルアルコールに一定濃度となるよう分散させ、銀ナノ粒子のコロイド溶液を作製した。その溶液を石英基板上にスピコート（SC）し銀ナノ粒子膜を作製し、光学特性を測定した。438nm にプラズモンピークが見られ、有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製に成功した。

b) Si 薄膜太陽電池への応用

シリコン系太陽電池裏面における反射率を測定するため、スパッタリング法により作製したアモルファスシリコン膜上に金属ナノ粒子膜を作製し、光学特性を評価した。さらにその構造の薄膜フルスペクトル太陽電池への応用を検討するため、金属ナノ粒子膜上に SiO_2 膜をスパッタリングすることにより金属ナノ粒子膜を安定化させ、耐熱性・耐久性の向上を目指した。スパッタリング法により、石英ガラス上にアモルファスシリコン膜を作製した。Ar0.7Pa 雰囲気下で電力 100W、スパッタリング時間 180sec の条件で作製したところ、膜厚が約 20nm のアモルファスシリコン膜が得られた。得られたアモルファスシリコン膜の光学特性を測定した後、銀ナノ粒子コロイド溶液をスピコートすることでアモルファスシリコン膜と銀ナノ粒子膜の複合膜を作製した。複合膜の光学特性とアモルファスシリコン膜の光学特性の差から、アモルファスシリコン膜上での銀ナノ粒子膜の光学特性を算出した。さらに、銀ナノ粒子膜上にスパッタリング法により SiO_2 膜を保護膜として作製し、光学特性を測定した。また、作製した銀ナノ粒子膜の反射スペクトルと、擬似単接合太陽電池 $[\text{ZnO}/\text{p}(\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{O}_x:\text{H})/\text{i}(\mu\text{c-Si}:\text{H})/\text{n}(\mu\text{c-Si}:\text{H})]$ の透過率および単結晶シリコン太陽電池の量子収率を用いて、薄膜フルスペクトル太陽電池に応用した際の電流密度向上値を見積もった。アモルファスシリコン膜を透過した光を基準とした銀ナノ粒子膜の反射スペクトルから、アモルファスシリコン膜上での銀ナノ粒子膜は 600nm 付近に反射スペクトルのピークが確認できた。銀ナノ粒子膜により反射される光による各波長における光電流密度向上を見積もるため、各波長での電流密度の増加予測値を積算した結果、銀ナノ粒子膜にさらに SiO_2 膜を作製した場合は約 $1.68\text{mA}/\text{cm}^2$ 程度の電流密度増加が期待できることがわかった。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：4（4）、研究発表・講演：15、新

聞・雑誌等への掲載：5、展示会出展：0

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

【平成 21～22 年度】（第 2 回中間評価時）

1)集光型多接合太陽電池評価技術

a)集光型太陽電池屋内評価技術

<H22 最終目標：従来の単接合太陽電池の高精度評価技術をベースとして、3 接合以上の多接合で集光倍率 500 倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術を開発する。>

太陽電池における評価手法の確立は極めて重要であるが、集光型太陽電池の評価手法については未だ統一された方法が無く、測定精度に課題があるのが現状である。本研究開発では、集光型太陽電池（集光型太陽電池セルおよび集光型太陽電池ユニット）の高精度な屋内評価技術を米国研究機関と共同で開発した。

1)集光型太陽電池セル性能評価技術

集光倍率 500 倍以上に対応できる集光型太陽電池セル単体の性能評価を屋内で高精度に実現するため、評価用光源（ソーラーシミュレータ）として、照度調整機構（可変範囲 50-1,000suns 以上）および 6 波長域での分光放射照度スペクトル調整機構を備え、6 接合構造まで対応可能なパルス発光型光源を導入し、高精度評価技術を開発した。高精度な屋内測定を行う上で必須となる性能確認・光学系の最適化を行った。パルス発光時間は約 1ms と短パルス型であり、高集光下におけるセル温度上昇を防いで、測定の高精度化を図るのに有利である。正確な基準太陽光との分光放射照度スペクトル合致度（合致度約±10%以内、class A for ASTM Standard E927-10）および多接合太陽電池の各要素セルに入射する実効的な照度およびそのバランス（基準太陽光比±2%以内）、有効照射面内における照度均一性（約 5cm 角内において±2%以内）を確認した。

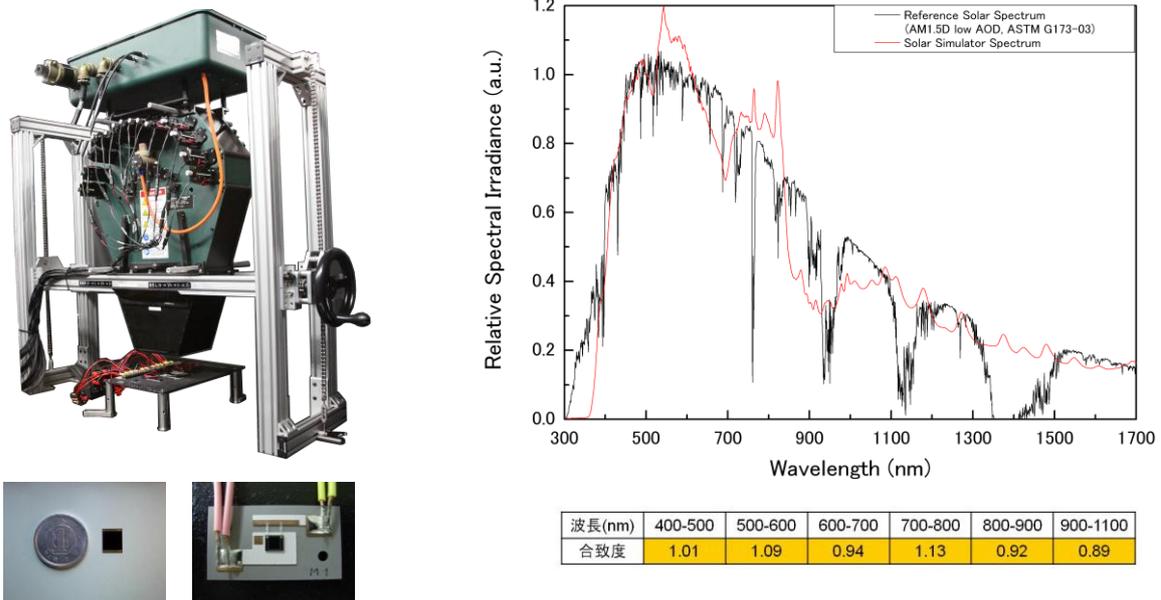
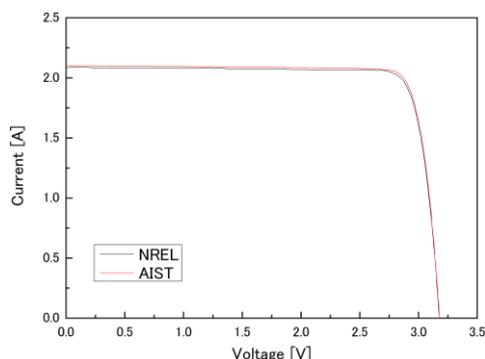


図 35. 照度および分光放射照度スペクトル調整機構を備えた集光型太陽電池セル評価用光源（左上図）および集光型太陽電池セルの一例（左下図）。高精度測定を行う上で必須となる性能の一つである基準太陽光とのスペクトル合致度（右図）は約±10%以内であり、ASTM 規格 E927-10 において class A を満たしている（黒線：基準太陽光の分光放射照度スペクトル、赤線：ソーラーシミュレータの分光放射照度スペクトルの一例）。

国際的整合性を持った性能評価技術を推進・検証するために、集光型 3 接合太陽電池セル（GaInP/GaAs/Ge 構造）について、米国 National Renewable Energy Laboratory (NREL) との測定結果の比較を実施し、測定精度の検証を実施した。NREL は米エネルギー省 (DOE) 傘下の国立研究所であり、所在地はコロラド州ゴールドデン市。照度約 500suns において、性能指標となる短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大出力 P_{max} 、曲線因子 FF の各パラメータにおいて約 1.2% の範囲内で、測定結果の

良好な一致を確認した。集光型太陽電池において、1,000suns 程度以上の更に高照度を目指したデバイス・集光系・システムの開発が進んでおり、今後の課題として 1,000suns 以上での高照度下における照度依存性を含めた測定結果の比較・検証、測定精度の不確かさ検証やその改善に向けた検討、および様々な種類の材料・構造の集光型太陽電池セルについても同様に国際比較測定を継続することで国際的整合性を持った高精度評価技術を確立すること、が挙げられる。



性能指標の比較項目	AIST	NREL	差(NREL/AIST)
照度 (kW/m ²)	499.1	500.1	+ 0.20%
短絡電流Isc (A)	2.103	2.086	- 0.81%
開放電圧Voc (V)	3.177	3.176	- 0.03%
最大出力Pmax (W)	5.77	5.707	-1.10%
曲線因子Fill Factor (%)	86.3	86.1	-0.21%
変換効率Efficiency (%)	35.1	34.7	-1.15%

図 36. AIST (赤線) および NREL (黒線) の集光型太陽電池セル性能測定結果の比較。約 500suns の照度での各性能指標パラメータにおいて約 1.2%の範囲内で、測定結果が一致していることを確認した。

ロ)集光型太陽電池ユニット性能評価技術

集光型太陽電池の評価においては、セル単体だけでなく、集光光学系を含めた集光型太陽電池ユニット（もしくはサブモジュール）の性能評価が実用上非常に重要である。集光型太陽電池ユニット性能を屋内で高精度に評価するために、太陽光球の視野角（±0.26 度）または集光型太陽電池ユニットの許容角（通常は±0.5 度～±1.0 度前後）と同程度の光束平行度を持ち、かつ、基準太陽光に近似した分光放射照度スペクトルを備えた集光型太陽電池ユニット評価用光源（高平行度ソーラーシミュレータ）および性能評価技術の開発を実施した。高平行度ソーラーシミュレータの基本性能の一つである光束平行度について、高精度な光入射角度センサを用いて実測し、装置構造から算出した理論的な視野角（±0.49 度以内）と非常に良く一致することを確認した。また実際の集光型太陽電池ユニットを本ソーラーシミュレータによって測定する場合は、光入射面のサイズにより見込み角の大きさが増加するため、その程度を予め把握しておくことが高精度な測定を行う上で必要となる。光束平行度を有効照射面内（17cm 角）で実測・平均化することにより、増加すると予想される見込み角の大きさについて定量的に確認した。

集光型太陽電池ユニット性能を高精度に評価する上で必須となる性能確認・光学的調整に関しては、有効照射面内における照度均一性（18cm 角内において±2%以内）、直達基準太陽光との分光放射照度スペクトル合致度（合致度：約±10%以内、class A for ASTM Standard E927-10）を確認した。また集光型多接合太陽電池の性能は、入射光スペクトルに依存した各要素セルで発生する光電流バランスに大きく影響を受けるため、基準太陽光下において各要素セルで発生する光電流バランスを再現するように入射光スペクトルの調整が必要となる。評価用光源内部の光学系に、分光透過率特性の異なる光学フィルタを適切に選択・挿入することで柔軟にスペクトル調整可能な機構を実現した。

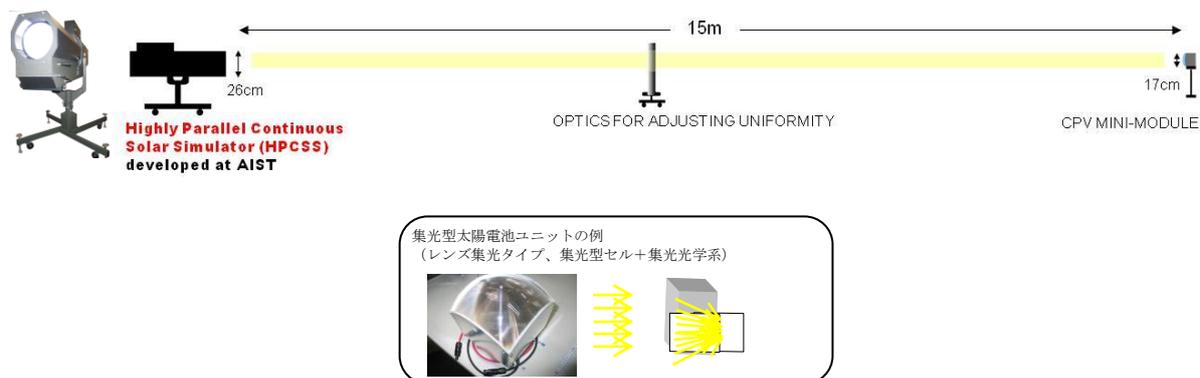


図 37. 集光型太陽電池ユニット評価用光源および性能評価の基本設計。光源の光出射部から被照射面までの距離を 15m とすることにより照射面中心からの視野角±0.5 度を実現した。また光路上に金属製メッシュを配置することにより、有効照射面における照度均一性が調整可能である。

設計・開発した高平行度ソーラーシミュレータを用いて、集光型太陽電池ユニット（集光型 3 接合太陽電池セル（GaInP/GaAs/Ge 構造）および集光光学系（約 17cm 角の 1 次集光光学系+セルにマウントされた 2 次集光光学系）で構成、設計集光倍率は 550 倍）の電流・電圧特性測定および測定精度の検証を実施した。測定結果から、性能指標となる測定パラメータ（短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大出力 P_{max} 、曲線因子 FF）について、約±0.6%以内の再現性を確認した。ややばらつきが大きい原因として、ソーラーシミュレータの照度安定性、電流・電圧測定時の電圧掃引速度、時定数などが考えられる。今後の課題として、測定精度の不確かさ検証やその改善に向けた検討、様々な種類の材料・構造の集光型太陽電池ユニットについて米国 National Renewable Energy Laboratory (NREL) との国際比較測定の実施等による国際的整合性を持った高精度評価技術の確立、が挙げられる。

b) 集光型太陽電池屋外評価技術

<H22 最終目標：集光型太陽電池システムを日米両国に設置し、屋内評価結果と併せて屋外での性能評価技術を開発する。>

PV システムの発電量を正確に予測する評価方式を開発するため、同一の集光型太陽光発電システム（CPV システム）を日米 2 サイトに設置し、発電性能の同時検証（比較）を行った。CPV システムは、レンズを用いて自然太陽光を通常の数 100 倍の光強度で集め、その光で小面積の集光型太陽電池によって発電する電源設備である。実証実験では、天候、特に快晴率や太陽光スペクトルの差による影響を評価するため、快晴率が高く乾燥した米国サイト（コロラド州オーロラ）と温暖湿潤な日本サイト（岡山市）を実験場として選んだ。また、日米欧 3 カ国で製造された、異なる性能の多接合型太陽電池セル 3 種を用いて同種の光学系・パッケージで作成された 3 種の CPV モジュールを CPV システムに搭載した。米国側のカウンターパートは、米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）である。設置場所は、SolarTAC（Solar Technology Acceleration Center）とした。SolarTAC は、米国最大の太陽エネルギー研究施設として、現在コロラド州オーロラに実験場を建設中の研究団体で、NREL はそのメンバー団体の一つ。日本では、岡山県岡山市の京山ソーラー・グリーン・パーク内に設置した。CPV システムは、そのポールマウントという設置工法の特徴から平坦地だけでなく傾斜地に設置することも可能であり、今回は国内で初めて丘陵地への設置を試みた。このため、岡山市街に位置しつつも、日当たりが良く、日射障害のない、実験環境が得られた。両サイトにおいてリアルタイムにデータを収集し、NREL と共有することで効率的に共同研究を実施する体制を整えた。

1) 屋外集光型太陽電池システム

日米両サイトとも年間の気温変化が大きいという共通性があるが、岡山と比較して米国サイトは、日照時間が長く、気温が低く、降雨量が少なく湿度が低い（より乾燥している）と言う気候の差がある。また、日本サイトは岡山市（人口 70 万人超）の市街地に位置しているが、米国サイトは、デンバー国際空港近傍の（日本人から見れば）砂漠のような平原であり、人為起因のエアロゾルの多少や、吹き上げられた砂塵の多少が両サイトにおける日射量や分光日射強度（スペクトル）に影響を与える可能性がある。気候的な差違について表 24 にまとめた。

表 24. 日本サイト（岡山市）と米国サイト（オーロラ市）の気候

	岡山市	オーロラ市 (Aurora)
◆地理		
緯度・経度	N34.67、E133.91	N39.7、W104.8
標高	80m（市街）	1,600m
◆気象		
日照時間	中程度（2,000時間）	高い（3,000時間）
直達日射	中程度	高い
エアロゾル	多い	少ない
大気水分	多い	少ない
平均気温	中程度（16℃）	低い（10℃）

集光型太陽光発電（CPV）システムは、ほぼ同一仕様のものを両サイトに導入した。僅かな差違は、系統連系のためインバータが各国仕様のものであること、地形に合わせたレイアウト（システムの配置）の違い、後述するリファレンス PV システムの架台の構造、程度である。CPV システムには、14kW タイプを採用した。米国 NREL との協議により、システムとしては米国製を導入せずに日本製のみを導入し、太陽電池セルに日本製と米国製を導入することにした。これは、気候差およびセルの性能差が発電量に与える影響を分析すると共に、システム（主に追尾装置）が与える影響を取り除くために、システムは同一仕様であるべきと判断されたためである。このため、各サイトについて同一のシステムを2式ずつ導入した。集光レンズの幾何学倍率は550倍。CPV アレイは0.5度未満の精度で太陽を追尾することになっている。強風時には、CPV アレイは真上を向く待避モードに自動移行するため、年間の設備稼働率に、設置場所の風況が影響する可能性がある。太陽電池セルは、日本製と米国製に加えて、ドイツ製の多接合型太陽電池セルを搭載し、比較することとした。メーカーはそれぞれ、SHARP、SpectroLab、Azur Space である。太陽電池セル単体の、集光下での変換効率は、メーカーによる公称値でそれぞれ40%近くであるが、CPV モジュールに組み込むと、モジュールとしての変換効率は25%となった。セル効率とモジュール効率の差を引き起こす要素としては、モジュール内の集光系の有効面積・温度・スペクトル・照度・構成セル間の均一性、等の、平板型太陽電池と共通の項目に加えて、CPV に特有な集光光学系の透過率・集光効率・追尾精度等の項目があり、CPV の評価は平板型よりも多くの要素を考慮する必要がある。今回使用したモジュール仕様は表25の通りである。

表 25. 設置した集光型太陽電池モジュールの仕様

セル種類	InGaP/GaAs/Ge ※1社の例
セル数	25
面積	0.68m ²
外形寸法	830×830×229mm
重量	15kg
筐体素材	アルミニウム合金
集光レンズ素材	PMMA 樹脂
幾何学集光倍率	550倍
許容角度	約±1度
適合する追尾架台の許容追尾誤差	±0.7度

本研究開発では CPV システムの発電性能を広く普及している結晶シリコン型の平板式太陽電池 FPV モジュールと比較するために、CPV システムの近傍に設置した平板式太陽電池モジュールの系統連系型システムを併設した。リファレンスシステムと呼ぶ。照度温度特性が解析し易い平板型の太陽電池を併設することは、CPV システム評価のための様々な解析に有用である。日米両サイト共に結晶シリコン型太陽電池を約 1kW 搭載した。架台の構造については、両国での普及形態を考慮し、日本では固定傾斜架台、米国では2軸追尾架台を採用した。気象観測システムは日米両サイト共に、全天日射計を平板システムの架台に設置した。風速・風向計、温度・湿度計も両サイトに設置した。風速データは、追尾架台を強風時に退避させる「退避モード」にも利用されている。1分間平均風速が

15m/s 以上の場合、退避モードとなる。CPV アレイ（追尾架台）には、直達日射計、全天日射計を付設した。CPV システムは 10kW インバータ 3 台により系統連系運転を行い、リファレンス PV システムも同様にインバータ 1 台により系統連系運転を行っている。システムの概観を図 38、39 に示す。

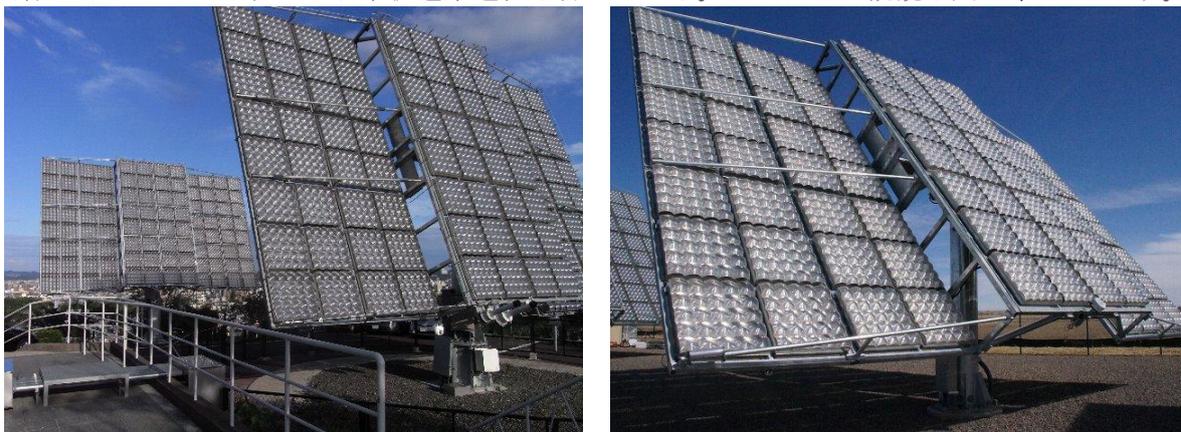


図 38. CPV システム
(左：日本 岡山サイト、右：米国 オーロラサイト)



図 39. レファレンス PV システム
(左：日本 岡山サイト、右：米国 オーロラサイト)

ロ) 発電データおよび発電特性解析結果

集光型太陽光発電（CPV）システムおよびレファレンス PV（平板型太陽光発電 FPV）システムは、日米両サイト共に平成 23 年 1 月 1 日よりデータ取得を開始した。CPV システムの日平均発電量・日平均直達日射量ともに、米国が、日本の 2 倍以上あり米国で導入が進む実情を反映している。発電性能を表す指標として、下式で定義されるシステム出力係数（PR）を用いた。

システム出力係数 (PR)

$$PR = \frac{\text{発電量}[kWh] \times \text{定格日射強度}[kW/m^2]}{\text{定格出力}[kW] \times \text{日射量}[kWh/m^2]}$$

現状では集光型太陽電池の性能評価に関する国際規格（IEC）は審議中であり国内・国外ともに統一された基準が整備されていないため、今回は定格出力にメーカー公称出力、定格日射条件にメーカー公称出力測定条件（ $1kW/m^2$ ）を PR の算出に用いた。最も大きな発電量が期待される夏季の発電性能は、一般的な FPV の場合、PR が 0.8-0.9 程度で推移することが多いのに対して、本研究開発の CPV の場合、日本、米国ともに PR0.9 以上と高い発電性能を示すことが実証された（図 40）。また日米の発電量比較や気象因子等の情報を含めて分析した結果、米国は、主にスペクトル効果により 6%近く発電性能が高いことが実証的に明らかになった。このスペクトル効果は、サブモジュールレベルでも追認しており想定以上にスペクトルによる発電性能の変化が大きいが明らかになった。集光型および非集光型の年間平均発電効率について、米国サイトおよび日本サイトの比較検証を実施（図 41）。集光型の発電効率は、非集光型の 2 倍程度で推移し、日米間の比較では、年間を平均すると顕著な差がないことを明らかにした。ただし米国サイトは冬期に影の影響を大きく受け効率低下が確認されている。

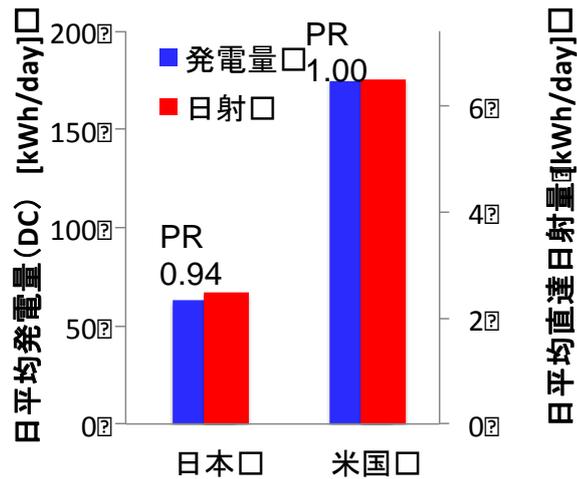


図 40. 日米発電性能 (PR) 比較 (日平均発電量と日平均直達日射量)

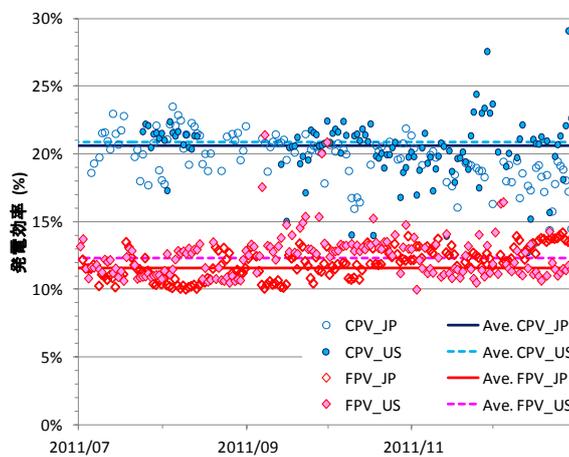


図 41. 日米発電効率比較 (集光型および非集光型)

集光型 (日本サイト) CPV_JP、集光型 (米国サイト) CPV_US、非集光型 (日本サイト) FPV_JP、非集光型 (米国サイト) FPV_US

3社のセルを搭載したサブモジュール (セル+集光光学系から成る、CPV モジュール構成要素) により、屋外におけるレンズ集光下におけるセル性能評価法について検討を行った。暴露前に屋内高精度評価技術 (集光型太陽電池ユニット性能評価技術 (前述)) により事前評価を実施した。この屋内測定評価を基に屋外評価を実施した。3社のセル比較 (図 42、43) では、セルの発電性能差よりもアライメント精度、特に追尾架台の追尾精度およびモジュールの設置精度に大きく影響を受け、年間を通してその傾向は変わらないことを確認した。この内容は審議中の国際規格 (IEC) に今後提言し、反映させる予定である。

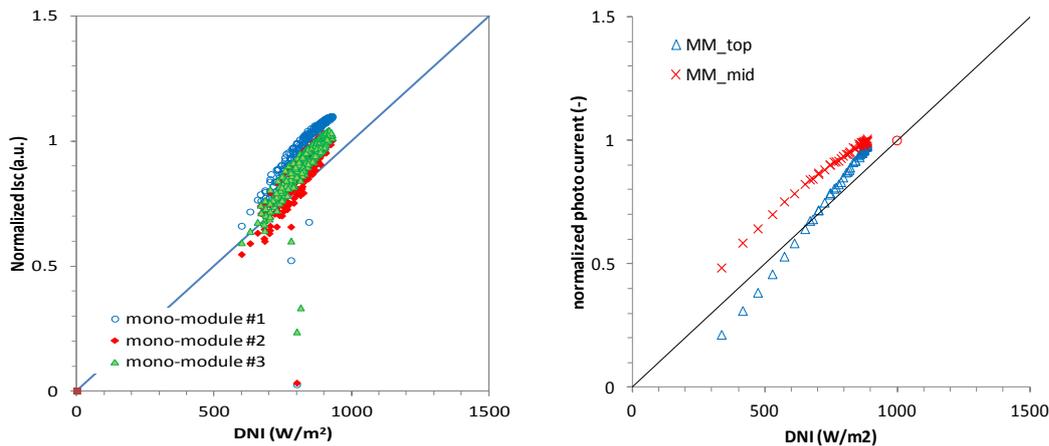


図 42. スペクトルによる発電性能変化（左：実測、右：シミュレーション）

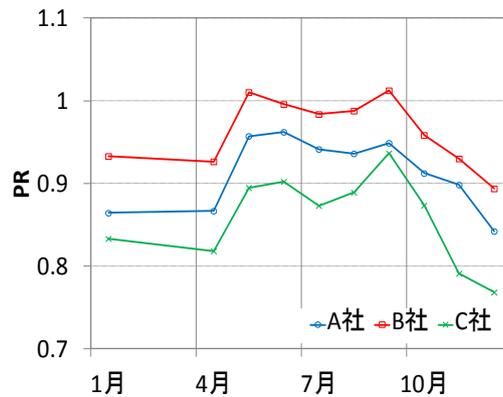


図 43. 3社のセル性能 (PR) 比較

集光型太陽光発電システムの評価手法を検討するために、レファレンスシステムとの性能比較を実施した。岡山（日本）サイトの CPV と FPV システム DC 発電効率を比較した冬期の一例では、CPV システムの DC 発電効率は、ピーク時に約 22%。FPV システムの DC 発電効率は、ピーク時に約 15%であった。CPV システムの DC 発電効率は、太陽高度の上昇とともにレファレンス PV システムを上回り、南中時には 1.5 倍以上となる。CPV および FPV システム共に冬季は、日出から午前 10 時、午後 2 時半から日没まで陰の影響がある。

単位面積あたりのピーク DC 出力について CPV システムと FPV システムの比較（ただし対象面積は、トータルエリア（パネル面）とした）の結果、CPV システムの単位面積あたりのピーク AC 出力は、FPV システムの 2-4 倍程度で推移し、面積あたりの発電量は CPV が優位である（図 44、45）。ラベル出力値に対するピーク AC 出力について CPV システムと FPV システムを比較した場合、冬季は、太陽高度が低く CPV システムが FPV システムを下回る。今回の対象期間（平成 23 年 1 月 1 日～2 月 12 日）において直達日射強度が $1,000\text{W}/\text{m}^2$ を上回る観測日はなく、日本国内の平野で $1,000\text{W}/\text{m}^2$ を超える事は稀である。したがって、直達日射強度が $1,000\text{W}/\text{m}^2$ の条件で値付けされている CPV モジュールで構成されたシステムの出力は、日本国内ではラベル値に対して低い値となる。CPV と FPV の PR を比較したもので CPV は夏の日射条件の良い時期に優れた発電性能を示し、平均発電効率は FPV の約 2 倍であった（図 46）。今後 PV 導入が進む高温高照度（サンベルト）地域で CPV が優位であることが今回の結果からも定量的に検証された。

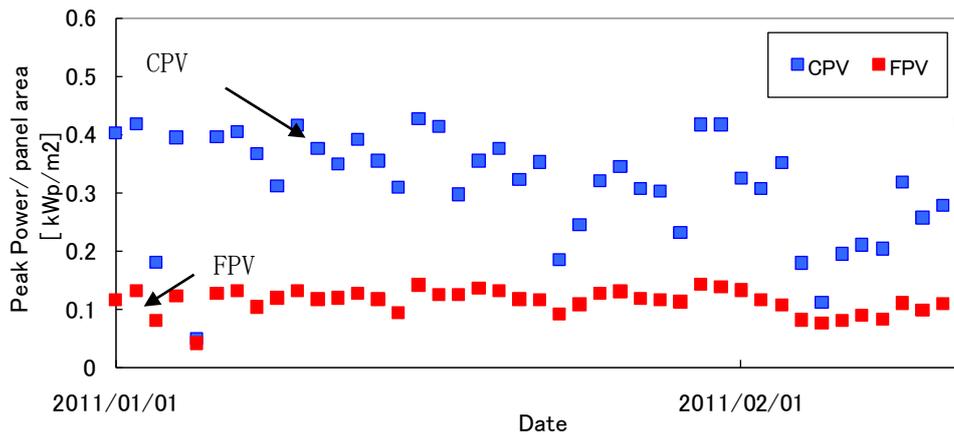


図 44. 単位面積あたりのピーク AC 出力比較 (2011 年 1 月 1 日～2 月 12 日)
 青■：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤■：レファレンス PV システム (FPV)

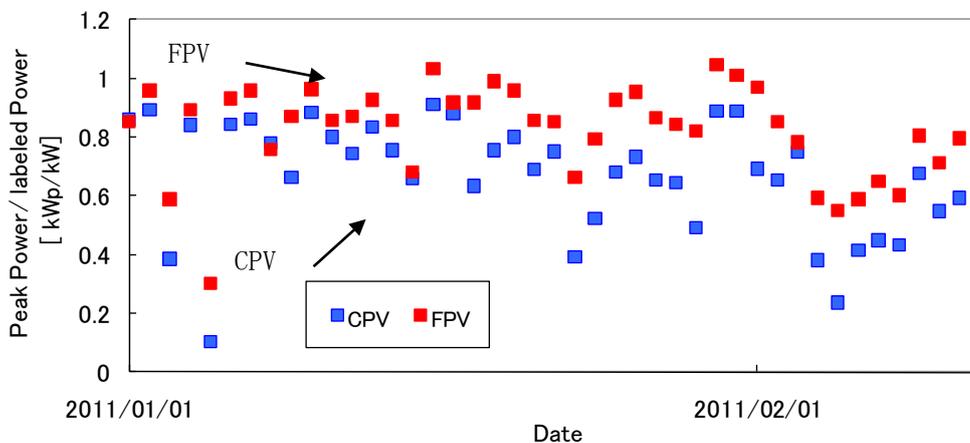


図 45. ラベル出力値あたりのピーク AC 出力比較 (2011 年 1 月 1 日～2 月 12 日)
 青■：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤■：レファレンス PV システム (FPV)

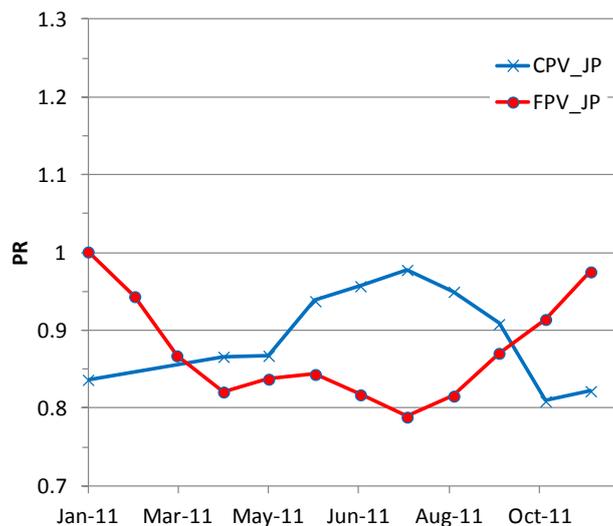


図 46. パフォーマンスレシオ (PR) の比較 (日本サイト)
 青線：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤線：レファレンス PV システム (FPV)

集光型太陽光発電システムは、優れた発電効率と発電性能を有している。しかし米国に比べて日本の気象環境は、全天日射強度に占める直達日射強度の割合が低く、現在のモジュール効率では従来型の先端の非集光結晶シリコンシステムを上回る発電量は得られていない。一方で集光型多接合

太陽電池の変換効率は近年著しく向上しており、今後も向上が期待できる。したがって、システム全体の効率が向上する余地は大きく期待できる。課題は、セル効率、集光の光学効率（光学ロスの低減）およびアライメント精度の向上が挙げられる。

集光型システムは、放熱性能に発電性能が影響を受けるため、環境条件（気温・風速・風向）等が重要である。また角度依存性が強く太陽周辺光（CSR）等にも影響を受ける。そのため国際標準化委員会（IEC TC82 WG7）では、屋内性能評価と共に屋外評価技術が重要であるとされ、屋内と屋外の評価を併用する方向で議論を進めている。現在審議中であるがエネルギー定格（IEC62670-1 CD）における集光型太陽電池の屋外標準条件（CSOC）として、直達日射強度 $900\text{W}/\text{m}^2$ が提案されている。日本の気象条件で直達日射が $900\text{W}/\text{m}^2$ に到達するケースは、日射条件の良い地域に限定されかつ期間も限定される。また、基準太陽光スペクトル（AM1.5D low AOD）と比較してエアロゾル（AOD 高い）が多くレッドリッチスペクトルになるケースが多い。したがって、屋外標準条件に換算するための変換法（IEC62670-3 Draft）が重要となる。正確に換算するためには、日射条件、スペクトル、温度等多角的な検討が必要であり非常に複雑である。この問題は、対応する屋内評価技術と合わせて開発する必要があり今後の課題である。

2) 薄膜多接合太陽電池評価技術

a) 革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術

<H22 最終目標：従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発する。>

1) 革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術

従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上の集積型薄膜太陽電池をモジュール構造で評価できる測定技術を開発した。3 接合、4 接合もしくはそれ以上の多接合太陽電池モジュールを測定するために、各要素セルの基準太陽光スペクトル下における出力電流を、高精度に再現する必要がある。産業技術総合研究所の従来の多接合モジュール測定技術では従来型薄膜 Si 系太陽電池モジュール（3 接合以下）の測定が可能である。一方革新型太陽電池では、各要素セルの分光感度特性が従来とは異なり、更に大幅に変化する可能性があるため、従来以上に柔軟かつ広範囲・高精度に分光放射スペクトルを制御することが必要となり、従来の技術では対応できなかった。この目的を達成するために、モジュールサイズに対応した有効照射面積内で $\pm 1.5\%$ 以内の良好な照度均一性と、任意の光学フィルタを挿入した状態で達成可能な均一照射光学系を備えた革新型多接合太陽電池モジュール用ソーラーシミュレータを開発した。分光放射照度の可変性、照度均一性、安定性等の基本的な性能を確認し、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での高精度な性能評価に対応できることを確認できた。

研究開発が進む革新型太陽電池では、集光型を前提とした構造等も含まれ、従来型の太陽電池と電極・外形等の構造が異なる可能性が高いと考えられるので、性能評価において重要となる照度・面積等の定義が重要となる。1sun 以上での性能評価に経験が深い NREL と議論し、集光型を含む革新型太陽電池セルにおいて、多く用いられる設計面積（designated area）の定義はセル周辺の外部取出し用集電極は除外するがセル内の集電用のグリッド電極は含める運用とした。革新型太陽電池で多く想定される 1sun ($1\text{kW}/\text{m}^2$) 以上における照度の計測法について、現状では、まず 1sun で校正した基準太陽電池セルを用いてサンプルの 1sun における性能を評価し、その上でサンプルの短絡電流 I_{sc} が照度に比例するとして照度を測定する方法がとられている。現状では線形性が良いとされている結晶 Si、III-V 族ではその方法が最も現実的な精度が高いと思われる。ただし革新型太陽電池で新材料が使用される場合には、その線形性を事前に確認した上で、サンプルの短絡電流が照度に比例しない場合には、線形性の確認された基準太陽電池セルを用いて照度を規定する方法が必要と考えられる。その場合にはソーラーシミュレータの照度による均一性やスペクトルの変化を更に精密に把握する必要があり、今後の課題である。

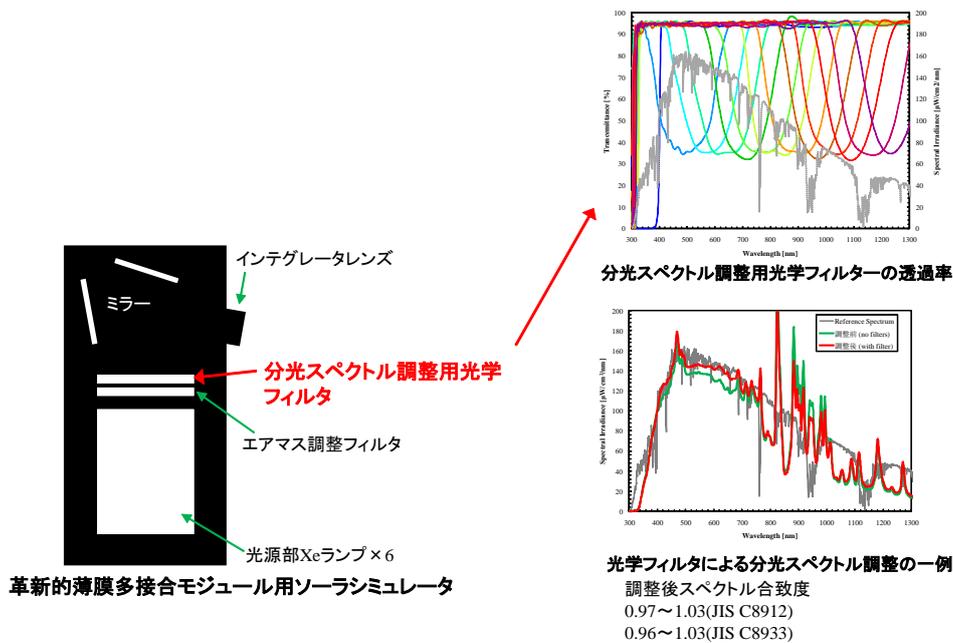


図 47. 革新的薄膜多接合モジュール性能評価用ソーラシミュレータと、3 接合以上に対応したスペクトル調整技術

b) 革新的薄膜多接合太陽電池信頼性評価技術

<H22 最終目標：革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証する。>

i) 革新的太陽電池組成分布評価技術

マイクロなレベルでの多接合太陽電池の評価を行うことを目的に、薄膜の微小領域での組成分布測定が可能な太陽電池材料組成分布評価装置を導入した。本装置は、細く絞られた電子線を試料に照射し、発生した特性 X 線の強度を測定することによって、微小な領域の元素組成や元素濃度を評価することができる装置である。変換効率が高く、禁制帯幅が制御可能であるなど、多接合太陽電池として優れた性能を有する CIGS 系太陽電池においては、その組成の面内均一性や不純物粒子の存在がその太陽電池特性に大きく影響を与える。この装置を用いて CuInGaSe₂ (CIGS) 系薄膜太陽電池の評価を行った。薄膜太陽電池の光吸収層として優れた特性を誇る CIGS 薄膜は 3 段階法と呼ばれる蒸着プロセスで安定して作製されるが、ときどき表面に黒ずんだ部分を生じるものがあり、そのような膜を用いて作製したセルは一般に良い性能をもたらすことはない。本研究開発では、その斑点が生成される原因を探るべく目標部位に「太陽電池材料組成分布評価装置」を適用して、微小領域の組成分析を試みた。SEM 像において CIGS 膜中にミクロンサイズの黒い斑点が観察された。この粒子の組成を分析したところ、高濃度の Na と O が検出された。この Na は青板ガラス基板から過剰に拡散してくるものと考えられる。CIGS 膜の性能を阻害する要因を元素および大きさに関しておよそ明らかにすることができた。今後はさらに製膜実験と詳細な観測を重ねてこの損傷形成のメカニズムを見出し製膜技術の高度化に繋げるように研究開発を進める。

ii) 革新的太陽電池ヘテロ接合界面評価技術

革新的薄膜多接合太陽電池のヘテロ接合界面のバンドオフセット評価を行うことを目的に、モノクロ X 線源装置を用いた光電子分光測定と分光エリプソメトリー装置等を用いたバンドギャップ測定より得られるヘテロ接合界面のバンドオフセット量評価が新規太陽電池開発に有効である事を a-Si_{1-x}Ge_x:H/c-Ge ヘテロ接合型太陽電池を用いて確認した。高効率を示す a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池の特徴として、開放電圧が高いことと開放電圧の温度依存性が小さいことが挙げられる。これらは a-Si:H/c-Si ヘテロ界面の価電子帯オフセット量および伝導帯オフセット量が大きく関与している。一方 c-Ge 系太陽電池は、III-V 族多接合型太陽電池のボトムセルとして用いられているが、c-Ge セル単体の研究は少ない。また、禁制帯幅が小さいため、c-Ge セルでは高い電流密度を得られるものの、開放電圧は低く、またその温度依存性は大きい。そのため、高温環境下では特に開放電圧が著しく低下するために変換効率も低下する。近年、我々はこの問題を解決すべくヘテロ接合の概念を c-Ge セルに適用し、開放電圧が高く温度依存性が小さい a-Si:H/c-Ge ヘテロ型太陽電池を作成できることを見出した。本研究開発では、a-Si:H/c-Ge ヘテロ界面でのバンドオフセットがセ

ル特性に与える影響を明らかにするために、バンドギャップが連続的に可変な $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 膜を用いてセルを作成し、Ge 組成とオフセットとの相関を調べた。その結果、 x の増加と共に価電子帯オフセット (ΔEV) が減少することが分かった。分光エリプソメーターで $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 薄膜のバンドギャップ (E_g) を算出し、伝導帯オフセット (ΔEC) を算出した。その結果、Ge 添加により ΔEV と ΔEC は共に減少することが分かった。p 型 Ge 基板を用いて作成した $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}/c\text{-Ge}$ ヘテロ接合型太陽電池の特性は、Ge 組成の増加とともにすべてのパラメーター (短絡電流密度、開放電圧、曲線因子) が低下した。開放電圧の低下は、 ΔEV の減少によりキャリアの逆方向への拡散が増加したことが一因と考えられる。一方、順方向電流を阻害する方向に存在する ΔEC が先に示した通り減少したにもかかわらず、曲線因子には顕著な改善が見られなかった。これは、 $a\text{-Si:H}$ への Ge の導入がバンドオフセットの減少と同時に表面パッシベーション能力の低下を引き起こしたことが原因と推察される。以上より、高電圧かつ曲線因子の良好な Ge ヘテロ接合太陽電池の実現には、表面パッシベーションを良好に保ちながら、 ΔEC を減少させずに ΔEV を低減可能な材料の開発が必要であると考えられる。

h) 有機太陽電池結晶構造評価技術

従来の有機薄膜太陽電池では、有機薄膜固有の短いエキシトン拡散長およびキャリア拡散長が変換効率の向上を制限していると考えられてきた。即ち、一般に有機薄膜のエキシトン拡散長は数 10nm であり、バルクヘテロ接合などの独自の構造を導入しても、太陽電池の最大膜厚は 200-300nm 程度に留まっている為十分な光吸収を阻んでいると言える。そこで、従来には無いアプローチとして、有機半導体を単結晶化させた新概念太陽電池を提案した。結晶性を向上させることでエキシトンの減衰因子を減らし、エキシトン拡散長を伸ばすことが目的である。これまでに報告例のないヘテロエピタキシーによる有機 p/n の作製を行い、構造を評価した。ルブレ単結晶はトレインサブリメーション法により作製した。ガラス基板上に静置したルブレ単結晶上に C_{60} を 1nm 真空蒸着し、 C_{60} の初期成長過程を観測した。 C_{60} は基板温度、蒸着速度に依存してさまざまな成長様式を示した。例えば蒸着速度 0.01nm/s (室温) における C_{60} 薄膜の原子間力顕微鏡 (AFM) 像によると、 C_{60} はステップとテラスで異なる成長をした。 C_{60} はステップでは凝集し、テラスでは fcc[111]面であると考えられる六角形、三角形の結晶核が形成されることが明らかになった。更に詳細な構造を調べるために、試料水平型薄膜 X 線回折を用いてルブレ結晶上に成長させた C_{60} 結晶の面内方位分布の測定を行った。 C_{60} の [220] 回折のロックングカーブを測定した結果、12 回対称を示すピークが得られた。 C_{60} 結晶が [111] 面では 6 回対称であることから、ルブレ単結晶上で 2 種類の面内方位で配向していることが考えられる。即ち、ルブレ単結晶上に C_{60} 結晶が高い整合性で有機ヘテロエピタキシャル成長しており、高品質の有機単結晶が得られていることが確認された。

ii) 革新的太陽電池材料過渡特性評価技術

励起子多重生成現象を利用した革新型太陽電池材料性能評価として、フェムト秒レーザーを用いた超高速時間分解発光スペクトル測定法の有用性に関し検討を行った。励起子多重生成は、逆オージェ過程と考えられており、その現象を捉えるためには超高速分光法が必要となる。試料には、革新型太陽電池デバイスとなり得る Si 量子ドットを有機物で表面パッシベーションしたバルクヘテロ構造をもつ有機/無機ハイブリッド材料を用いた。その結果、Si 量子ドットの表面パッシベーションが不完全なため、光誘起キャリアが表面欠陥準位を経てエネルギー緩和し、励起子多重生成が確認出来ないことを明らかとした。これは、材料内で生成したキャリアの過渡応答を調べる事で初めて明らかとなった現象であり、より完全に Si 量子ドットの表面をパッシベーションする事で、Si 量子ドット内で励起子多重生成の発生に期待が持てる結果である。このようにフェムト秒レーザーを用いたキャリアの超高速過渡現象測定は、未知の材料開発・改善に有効であることが示された。

h) 革新的太陽電池微視的構造評価技術

薄膜太陽電池モジュールは、一般にガラスなどの大型基板上に一括作製されるが、その発電特性は多くの場合微視的な欠陥や不具合に左右される。従って、太陽電池内部の微視的な情報を得ることは、発電特性や歩留まりの向上・劣化要因の解明の観点から極めて重要である。特に多接合化が進む薄膜シリコン太陽電池の分野では、多接合化によって生じる新たな技術的課題が多数存在し、それらの克服には微視的な評価が不可欠なことが多い。例えば、多接合太陽電池に挿入する中間層材料の開発と評価、広帯域な多接合太陽電池に適した光閉じ込め用テクスチャ構造の開発と、テクスチャ構造上に製膜された発電層に発生する微視的構造・欠陥の影響評価、が挙げられる。また、透明導電膜の高品質化も極めて重要な課題となっている。本研究開発では、これらのうち中間層と透明導電膜に着目し、中間層の局所導電性、TCO のアニールによる結晶粒系変化等、微視的評価を通じて薄膜多接合太陽電池の高性能化に資する知見を得た。

ハ)信頼性評価技術

革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証するために、太陽電池材料信頼性加速試験装置を設計・仕様の検討を行い、つくば研究センター第二事業所内に導入した(図48)。以下に仕様の概略を記す。

- ・収納モジュール：フルサイズ(1.4m×1.1m)2枚
- ・チャンバー両面から光照射
- ・1面は白色照明
- ・1面は紫外光・青色光・赤色光・赤外光の4波長混合
- ・LED照射とすることで、長期間ランプ交換をせずに連続試験が可能

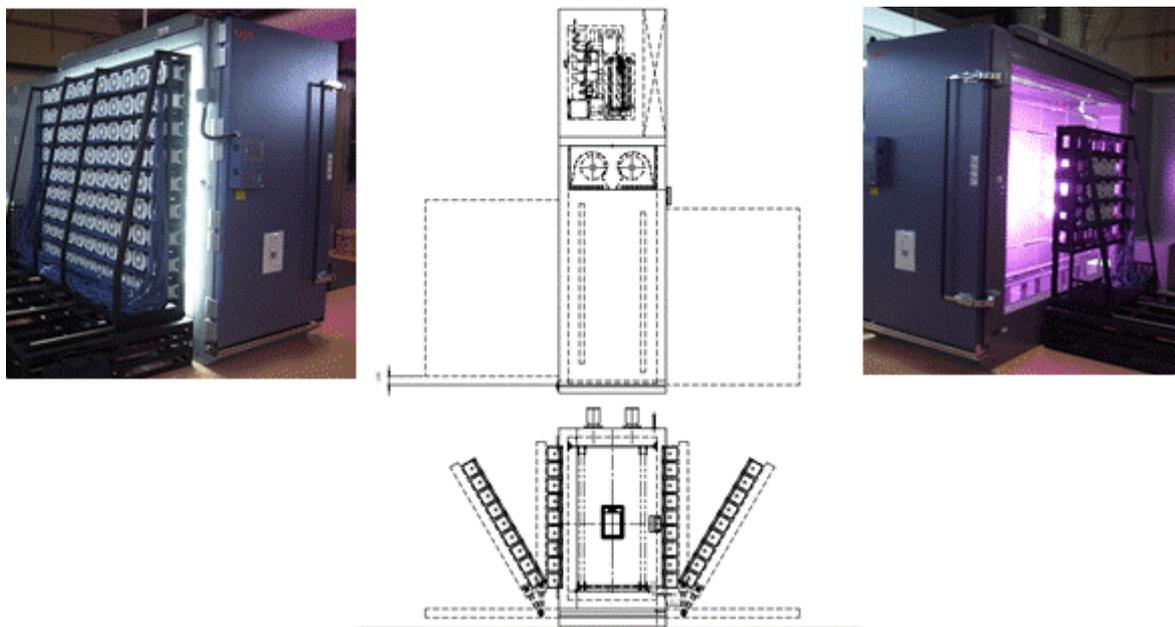


図48. LED式光照射試験装置

装置は、光源としてLEDを用いることを特色としており、この特色を活かした長時間(5万時間)ランプ交換無しで連続運転も可能である。また、LED光源は所定の照度で安定するまでの時間が短時間で可能であることを活かした光デューティサイクル試験や特定部位ごとに照度を変えることができるため、ホットスポット試験とダンプヒート試験などを組み合わせた試験も可能と考える。これと平行して、メタハラ光源による試験を進めるために、レンズ部およびレンズ材料の入手を進め、試験前後での材料特性変化を評価した(図49)。試験後は、400-500nm、1,400nm近辺、1,800-2,000nmで透過率が低下していることが明らかとなった。

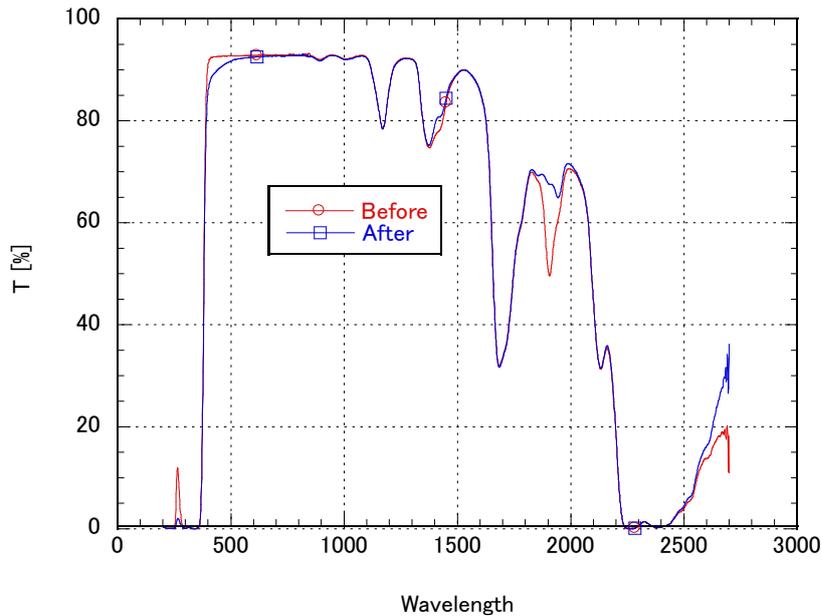


図 49. 集光型太陽電池のレンズ部材（アクリル）の光照射試験結果

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：0、新聞・雑誌等への掲載：3、展示会出展：0

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

【平成 23～24 年度】（第 2 回中間評価時）

1) 新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発（豊田工業大学、再委託：宮崎大学、旭化成）

<H24 中間目標：Ⅲ-V-N 系新材料、Ⅲ-V 系オン・シリコン新構造の評価解析技術確立。H26 最終目標：Ⅲ-V-N 系新材料、Ⅲ-V 系オン・シリコン新構造太陽電池のセル変換効率 30%以上>

a) Ⅲ-V-N 系新材料タンデム構造太陽電池の研究開発

Ⅲ-V-N 系新材料(In)GaAsN 太陽電池の実用化に向けた最大の課題は、N 起因の複合欠陥が導入され、キャリア移動度、キャリア寿命が低下することである。N 起因の複合欠陥の起源を原子スケールで理解して、欠陥を低減することが、太陽電池の効率向上に必要不可欠である。そこで、N 起因の複合欠陥の一つである N-H 複合欠陥の構造解析を偏光フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 法により行った。N-H 複合欠陥に帰属できる複数の FT-IR ピークの偏光成分を解析して、これらのピークの一部を異なる欠陥構造に分類し、その欠陥構造の結晶方位依存性を検討した。さらに、GaAsN のバンドギャップを光励起して、これら N-H 複合欠陥に生じる変化を時間分解赤外分光法により調べた。その結果、波数 962/cm に FT-IR ピークを持つ N-H 複合欠陥に光励起キャリアがトラップ、あるいは接近することでピーク位置が 990/cm にシフトする可能性が示された。以上の結果から、N-H 複合欠陥の構造や電荷状態に関する有用な知見が得られた。さらに、Sb サーファクタントの添加が GaInNAs 結晶品質に及ぼす効果の検討を行った。原子状水素援用 MBE 法による GaInNAs 結晶成長時に、最適量の Sb を照射することによりポテンシャル揺らぎを約 1/3 まで改善させることができ、また N に起因した電子トラップ準位の改善効果に関しても、最適量の Sb を照射することによりトラップ密度を 1/5 程度まで低減させることに成功した。このことから Sb サーファクタントが N 原子の結晶中への均一な取込みに有効であることを明らかになり、これを基に GaInNAsSb 太陽電池の試作評価を行った。

b) Ⅲ-V-N 系新材料の欠陥構造解析（宮崎大学）

CBE 法を用いて作製した GaAsN 薄膜に関して 3 次元逆格子図 (3D-RSM) 測定を適応し、各逆格子点の回折強度分布を得る事に成功した。面内方向 (HK 面) で [110] 方向への散漫散乱が見られ、Ⅲ族元素を中心とした格子不整合転位形成が示唆された。V 族元素を中心とした格子不整合転位形成は確認出来ず、N の混入により Ⅲ族中心転位の形成促進、あるいは V 族転位形成伝搬阻害の可能性が示唆された。

c) III-V系オン・シリコンタンDEM構造の研究開発

GaAs/Si 太陽電池は、安価な Si を利用することにより、比較的低コストで高変換効率を目指した多接合太陽電池である。GaAs/Si 太陽電池の課題は、4%程度の大きな格子不整合度により生じる欠陥の電気特性への影響である。この課題への取り組みとして、欠陥を封じるバッファ層の開発を検討中である。バッファ層の最適な組成や成長条件を求めるために、現在、バッファ層の成長中における欠陥生成機構の観察と理解を目的とした研究を行っている。Si 基板上 GaAs の成長と、成長中における格子緩和、もしくは転位生成過程の観察には、SPring-8 ビームライン 11XU における、高輝度 X 線回折装置を組み込んだ分子線エピタキシー装置 (MBE-XRD) を用いる。更に、成長後における欠陥評価手法を合わせることで、GaAs/Si 中の欠陥生成機構を解析する。現在、SPring-8 における予備実験と成膜後の試料の断面 TEM 観察による欠陥評価を実施している。

d) III-V系化合物半導体の欠陥構造解析 (宮崎大学)

また、GaAs on Si の結晶成長中に 3D-RSM 測定を適用し、10-20ML 成長するごとにリアルタイムでの測定に成功した。成長と共に GaAs の Bragg ピーク近傍に[111]方向のストリークが発生する様子が明瞭に観察され、成長中の[111]面欠陥形成過程に関する知見が得られると期待される。

e) 新規バッファ層構造の探索 (旭化成)

Si 基板上に化合物半導体からなる太陽電池を作製することは、チップコストやプロセスの安定性で利点があるが、格子ミスマッチによる欠陥の導入などが原因となってエネルギー変換効率を著しく低下させる。この問題を解決して良好な結晶性を持つ化合物半導体層を成長するため、MBE 法を用いて新規バッファ層の探索を実施する。

f) 種々の化合物半導体成長条件の把握

on Si で比較的良好な結果が得られている InSb の成長条件を参考に、欠陥低減につながる buffer 層についての知見の収集を狙いとして、MBE を用いて種々の半導体 (GaAs, AlAs, InAs, AlSb, GaSb, InSb) を成長した。上記の共通条件として、基板は Si[111]面を用い、HF により自然酸化膜を除去後、MBE に導入して As 照射条件下で加熱した後、低温成長 (LT) /高温成長 (HT) の 2 段階成長で化合物半導体層を成長している (詳細は既出願特許: W008/123141 による。)。成長後の各薄膜について、[111]面内の回転双晶の様子を観察するため、非対称[220]面に対して ϕ 方向の全周 scan を行った。その結果、GaAs, AlAs, GaSb, AlSb では 60 度の回転双晶が確認されたものの、InSb, InAs においては双晶は観察されずシングルドメインとなった。すなわち III 族に In を用いると回転双晶の生成を抑止する効果が期待できる。そこで GaAs 成長においても成長初期に In を 1layer 相当分導入し比較した結果、回転ドメインの割合が大幅に減少し、In 初期成長層の効果を確認した。

g) Sb 系バッファ層の検討

InSb などの Sb 系半導体の成長では、ミスマッチの大きなヘテロ成長においても格子緩和が非常に早く、良好な平坦性が得られていることから、2 次元的な結晶成長モードに移行させることを狙いとして、Sb を同時照射しながら GaAs を成長することを検討した。基板には Si[111]を用い、膜厚 $1\mu\text{m}$ の GaAs:Sb 膜を成長して結晶性、平坦性を比較した。まず Sb の照射量を変えて成長した膜の表面を AFM で観察したところ、Sb 照射量の増加に従って成長核の広がりが大きくなり、平坦性が向上している傾向が見られた。また、成長温度を変えて表面を比較したところ、成長温度が高いほど平坦性も高くなっており、2 次元的な成長が維持されていることを確認した。これらの効果を平面 TEM によって比較したところ、Sb 照射によって積層欠陥密度が大幅に低減出来ていることが分かった。

h) 多接合太陽電池材料の集光動作解析 (宮崎大学)

集光型太陽電池モジュールは、レンズとセルのペアが 25 個、直列につながった構造をしている。モジュールの面内には温度分布が生じており、真ん中のセルの温度が高く、端のセルの温度が低い。これまでの回路シミュレータでは、このように、様々なセル温度を考慮した計算ができなかったが、今回、それぞれのセルに温度に対応したパラメータを設定することで、モジュール内の温度分布を考慮した、集光型太陽電池モジュールの動作解析シミュレーションが可能となった。本手法を用いることで、ソーラーシミュレータで測定した実測値だけでなく、屋外で実測した実験結果にも非常に精度よく一致する計算結果を得ることができた。

i) 集光型太陽光発電システムの実証 (宮崎大学)

集光型太陽電池は直達光のみを利用できるため、レンズ表面に汚れが付いた場合、その部分に照射された光は散乱光となり発電に寄与できなくなる。そのため、レンズ表面に汚れがつかないように保つことが重要である。集光型太陽電池のレンズ材料として主に用いられる PMMA を基板として防汚コーティングを施した。防汚コートが有りのサンプルおよび無しサンプルを、屋外に暴露した。サンプルの透過率および太陽電池の分光感度、さらに太陽光スペクトルを用いることにより、集光

型太陽電池の電流を予測することが可能であり、暴露時間と電流減少率を調べた。8 か月暴露後、防汚コート無しのサンプルでは電流減少率が 9.6%になってしまうのに対し、防汚コート有りのサンプルでは電流減少率を 3.3%に抑えることができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：6（5）、研究発表・講演：57、新聞・雑誌等への掲載：18、展示会出展：0（受賞実績：1）

2) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発（東京大学、再委託：神戸大学、タカノ）

<H24 中間目標：量子・ナノ構造の評価解析技術確立。H26 最終目標：量子・ナノ構造太陽電池のセル変換効率 30%以上>

a) 量子・ナノ構造セルの研究開発

多重量子井戸構造をミドルセルに導入した 3 接合・4 接合集光型タンデムセルの開発に向けて、平成 23 年度はまずインペリアルカレッジ、フラウンホーファー研究所と共同で試作セルの量子井戸構造を決定した。次に InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸挿入 GaAs セルの変換効率向上に向けて、1.2 eV の吸収端を有する階段ポテンシャル量子井戸を作製し、低温やバイアス印加条件下でのフォトルミネッセンス、時間分解フォトルミネッセンスを測定し、キャリア取り出しの効率化に関する評価を行った。またヘテロ界面の組成急峻化を目指したガス供給シーケンスの改良を行い、100 層以上の歪み補償成長を満たしつつ障壁層の厚さを 3.1nm まで薄くすることに成功した。高精度のウェハ曲率モニタリングにより積層量子井戸成長における 1 層ごとの歪みの蓄積・開放を高精度で観察することが可能となり、これにより InGaAs/GaAsP 量子井戸型集光セルの作製が高精度で行うことができるようになった。集光型中間バンド量子ドット太陽電池の開発では、まず InAs/GaNAs 歪み補償量子ドットセルにおいて、量子ドット層を直接ドーピングすることにより期待されるセル特性の改善効果の評価を行った。量子ドット 1 個あたりに Si 原子約 1 個の割合でドーピングを行った量子ドット太陽電池において短絡電流はアンドープの量子ドットセルの約 1.27 倍にあたる $30.6\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成し、Si の直接ドーピングによる太陽電池特性の改善を明らかにした。またマドリッド工科大学と協力して、この不純物ドーピングセルを中心にフォトリフレクタンス測定を行い、量子ドット部の吸収帯の評価を行った。一方、50 積層 InAs/GaNAs（ドーピングなし）量子ドットセルでは、マドリッド工科大学で集光特性の評価を行い、開放電圧が集光倍率の増大とともに早く回復し、レファレンスセルの V_{oc} に近づいていく理論計算でも裏付けられる傾向を観測した。このとき変換効率は 21.2%（1,000 倍集光）が得られた。

b) 量子・ナノ構造集光型セルの評価解析技術の開発（神戸大学）

太陽電池動作における効率の良い電流の取り出しと動作中のキャリアの平衡状態は、ナノスケールの量子構造に顕著に影響を受けるため、その特性の詳細な解析はセルの開発に不可欠である。そこで光生成されたキャリアの変化を動的に追跡するために、超高速発光寿命評価解析技術の開発を行った。透過損失を生みだす太陽電池で最も重要な波長である近赤外光に応答する量子・ナノ構造材料を精密に評価するために、近赤外に最適化したストリークカメラを使用した。ストリークカメラは多波長同時に発光スペクトルの時間発展を計測できる装置で、入射する発光を光電変換と電子に変換し、電界走引によって 2 次元イメージで発光のダイナミクスを高感度にとらえる技術である。本研究開発で用いたストリークカメラの時間分解能は 20ps、最大繰り返し周波数は 20MHz の世界最高性能を有する。発光寿命に応じてパルスを間引くシステムを同時に構築し、集光型セルに使用する量子・ナノ構造の詳細な評価を行った。平成 24 年度は不純物制御した InAs/GaAs 量子ドットにおける無輻射遷移の抑制効果を調べ、Si-dope 試料では高エネルギー側にて無輻射再結合成分が顕著に抑制されていることを明らかにした。無輻射再結合過程の抑制が顕著になる励起エネルギーでは入射光は量子ドット層にまで到達しておらず、量子ドット直上のキャップ層に存在する無輻射再結合中心が発光強度の減少に起因しており、ドーピングした Si から供給される電子が非輻射再結合中心を飽和（中性化）させていることを示している。すなわち、ドーピングを行わない量子ドットにおける非輻射再結合の起源として、電子トラップの存在が重要な役割を果たしていることを示唆するものである。この結果は、太陽電池セルにおける光生成キャリアの拡散過程における再結合損失を抑制していることに相当しており、集光型セルへの応用が期待できる。さらに、東大、インペリアルカレッジと共同で多重量子井戸におけるホットキャリアの時間的変化についても研究を進めた。

c) 量子・ナノ構造集光型セル特性評価解析システムの開発 (タカノ)

量子・ナノ構造タンデム太陽電池を実現する上で、試作したセルの分光感度等の特性評価が必要となるが、従来既存の装置では本研究開発で目的とする評価解析が十分行えない。平成 23 年度は、評価解析の目標とその詳細内容を協議し開発仕様を明確にするとともに、必要な技術調査を進めて詳細な設計開発を具体的に着手するための検討期間とした。開発する評価解析システムでは、サブセルごとに分光感度・量子効率の測定が行える。太陽光スペクトルの広い波長範囲 (300-2,000nm) の光源を搭載するだけでなく、量子・ナノ構造セルの評価に必要な波長範囲も網羅できるようにすることとして機構的な設計検討を進めた。なかでも本装置の特徴の一つは、各サブセルが持つ感度波長のレーザースポット光源を搭載し、これをガルバノメーターで走査してセルからの起電流変化を画像化することができることである。これにより、分光特性や電気的な測定だけでは解析できない各サブセルの発電分布ムラや不良部を可視化することが可能になり、製膜プロセスの改善や発電不良原因を解析する有効な手段として使用することができる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 1

3) 先進構造による高効率集光型構造太陽電池の開発 (シャープ)

<H24 中間目標 : セル変換効率 42%以上。H26 最終目標 : セル変換効率 45%以上。>

「①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」で開発し、1sun 変換効率 36.9%と世界最高効率を更新した逆積み 3 接合セルについて、セルサイズや電極ピッチのカスタマイズ化を行い (4×4mm² サイズ、電極ピッチ 200 μm)、レシーバー化し、産業技術総合研究所およびフラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所において集光特性を評価した。フラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所の測定で、240.7-306.3 倍において世界最高タイ記録であり平成 24 年度中間目標をクリアする 43.5%の変換効率を確認した。先進構造太陽電池開発として、3 番目セルを Eg=1eV の InGaAsN セルや量子構造挿入の GaAs セルとする格子整合系 4 接合セルの検討に着手した。シャープでボトムセルとなる Ge セルを形成し、3 番目セルの成長検討を行ってもらうために豊田工業大学及び東京大学に提供した。平成 23 年 6 月マドリッドにおいて開催された本研究開発の日 EU 同会議で決められたマイルストーン実施のために、技術者 2 名をフラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所に派遣し、集光セル効率測定技術や Si 上の III-V 族化合物成長技術、ウェハボンディング技術に関わる情報交換を相互に実施した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

4) 集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発 (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 各種集光型太陽電池の 200-1,000 倍程度の集光時に於ける性能評価において、EU 研究機関との比較測定を行い、測定精度の検証と高精度化のための課題を明確にする。H26 最終目標 : 多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が ±0.5%以内の測定技術を EU 研究機関と共同で確立する。>

a) 集光型太陽電池セル評価技術

集光型多接合太陽電池セル単体の性能評価技術に関して、フラウンホーファー研究所とのラウンドロビン測定実施のための性能確認・調整および高精度化を行い、測定に必要な照度均一性 (±2%以内、約 5cm 角内)、多接合太陽電池の各要素セルに入射する実効照度およびそのバランス (基準太陽光比で ±2%以内)、照度の時間変動率・再現性 (1%以内) を含むパルス安定性、接触抵抗を低減するプローブ (プローブ先端は低抵抗の BeCu 製、耐疲労性・弾性係数等に優れた特性を持つ) の選定、等を検証・確認した。2 種類の集光型 3 接合太陽電池セル (GaInP/GaAs/Ge 構造および GaInP/GaAs/InGaAs 構造) について約 700suns までの集光下における電流-電圧特性の評価が可能であることを確認し、同一の集光型太陽電池セルについてフラウンホーファー研究所との第 1 回ラウンドロビン測定を実施した。外部量子効率および 1sun での電流-電圧特性を比較した結果、電流-電圧特性パラメータにおいて約 1.8%の範囲内で測定結果の一致を確認した。今後更に高精度化を図るとともに、高照度化でのラウンドロビン測定を行う。

b) 集光型太陽電池ミニモジュール評価技術

集光光学系を含めた集光型太陽電池ミニモジュールの屋外実環境における性能評価技術開発を考慮し、屋内評価用ソーラーシミュレータとして開発した高平行度定常光光源 (照射面中心からの視野角 ±0.5 度) の性能確認・調整および高精度化を実施した。上記検討に加えて、光入射面のサイズ

により増加する見込み角の程度の詳細を定量的に評価するため、受光面から見た照度の光入射角度依存性（0.65 度以内に 90%、0.9 度以内に 100%）、ミニモジュール性能の角度依存性評価、等の技術検討を実施し、フラウンホーファー研究所とのラウンドロビン測定の日本側測定を実施した（現在フラウンホーファー研究所での測定中）。ミニモジュール性能を屋外環境で評価する為の太陽光追尾架台等を整備した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

5) 高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証（大同特殊鋼）

<H24 中間目標：モジュール変換効率 33%以上、既存集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析。H26 最終目標：モジュール変換効率 35%以上、50kW 集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析、発電量予測。>

高効率と低コスト（高精度を必要としない追尾架台、設置工事）を両立させる新型光学系（ドーム型ケーラー光学系）の設計を完了した。1,000 倍集光にも関わらず±1.2 度の広い許容精度を有している。平成 24 年度末までには本光学系を用いた光学系及びモジュールの試作が完了する見込みである。集光モジュールの高効率化についても効率 37.7%の市販セルを用いてモジュール効率 31.7%が確認された（自社評価）。これは効率 43%セルを用いた場合、36.2%のモジュール効率に相当する。集光型太陽光発電システムにおいては、モジュール効率だけでなく、実際の発電量も重要である。温度上昇によるモジュール効率低下およびレンズの汚れに対する効率低下を最低限に抑制しなければならない。宮崎大学と共同で防汚コーティング、筐体構造の最適化、放熱コーティング技術を開発した。これら技術を取り入れた 50kW 発電システムをスペインに建設し、実証試験を開始した。これらの技術は高性能化のみならず、低コスト化および施工容易化に大きく供することになるものであり、平成 27 年度末までに実用化を目指す。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：14、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

3. 成果発表の件数

各研究開発項目毎の成果発表件数を表 26 に示す。

表 26. 成果発表の件数 平成 24 年 6 月末現在

研究開発項目	特許出願		論文 (査読付)	研究発表 ・講演	新聞・雑誌等掲載	受賞 実績	展示会 への出展
	国内	外国					
ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	19	3	162 (156)	856	66	20	11
高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	47	13	267 (221)	832	19	25	13
低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	51	12	69 (69)	441	24	15	12
革新的太陽電池評価技術の研究開発	0	0	0 (0)	0	3	0	0
高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発	1	0	16 (15)	82	22	2	1
合計	118	28	514 (461)	2,211	134	62	37

※一部小項目の発表件数が重複しているため、表中の数と各項目の発表件数の総数とは一致しない。

IV. 実用化の見通しについて

1. 実用化の見通し

本事業の研究開発終了時点における目標は、2050年における変換効率および発電コスト目標の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することである。

従って本事業での研究開発は、一般には実用化までにもう一段、即ち次段階の実用化研究（量産化技術開発、スケールアップ研究開発、企業との共同研究など）に引き継がれる必要がある。

ここでは、現時点で考えられる各研究開発項目における実用化について表 27 にまとめる。

表 27. 各研究開発項目における実用化の状況・見通し

開発項目分野	実用化の状況・見通し
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	
1) 3接合太陽電池（格子不整合系）	<p>格子不整合系逆エピ3接合セル（InGaP/GaAs/InGaAs）において、非集光で37.5%（世界最高記録）、300-500倍集光下で43.5%（世界最高タイ記録）を樹立した。なお、集光タンデムセルの世界最高記録は、平成23年4月、米国Solar Junction社がInGaP/GaAs/GaInNAs格子整合系3接合セルで達成した。本研究開発では、平成24年度末までに1,000倍集光に対応した電極・トンネルダイオード等の低抵抗化を推進し、1,000倍集光下で変換効率45%（最終目標値）を達成できる見込みである。このような順調な高効率セルの開発状況を受け、加速案件として集光モジュールの評価に着手した。ここでは、シャープが新たに高倍集光（×1,000）および低コスト化を目指して開発した新規集光モジュールを、東京大学と協力して高照度地域（アリゾナ）で評価し、東京において同時進行する評価結果を参照しつつ高倍集光モジュールの実用化に向けた発電データを蓄積する。</p> <p>世界における集光型太陽光発電（CPV）の導入状況としては、Amonix、Guascor Foton、Soitec、Solar Systemsなど民間企業による10MW級大規模発電の導入が進んでいる。今後の大規模CPV導入にあたっては、モジュール変換効率向上による必要面積の低減が導入コストの削減に大きく貢献する。日本はCPVの世界展開において後れを取っているが、本研究開発の成果をもとに1,000倍集光の超高効率モジュールを市場投入し、トータルコスト面での競争力を武器にシェアを増やすことは可能である。ただし、海外の高照度地域へのシステム導入には、国内のセル・モジュールベンダーだけでなく、国内プラントエンジニアリング企業、さらに現地企業との密接な協力が不可欠である。また、中東産油国は高照度と豊富な資金により大規模太陽光発電の導入対象として魅力的、経済合理性の高い市場と目されるが、文化の差異など我が国の市場参入には障壁が大きい。このような課題を解決して世界規模での大規模太陽光発電の導入を図るため、東京大学では寄付講座”Global Solar+ Initiative”（GS+I）を設置し、サウジアラビア等中東産油国への大規模太陽光発電導入に向けた経営戦略・技術両面からのアプローチを行っている。本事業の主要メンバーであるシャープもGS+Iのなかで活動している。このような取り組みを通して、本研究開発の成果である超高効率太陽光発電モジュールが米欧豪など既存のCPV普及国だけでなく新たな市場に導入される日は間近であると考えている。</p>
2) 3接合（格子整合系）、4接合	<p>量子井戸あるいはGaInNAs（量子ドット挿入型を含む）をミドルセルに用いる格子整合系3接合セルは、先に高効率セルの実証が進んでいる格子不整合系に比べてエピタキシャル成長の層厚を大幅に低減でき、コスト削減のために魅力的である。実際、シャープと集光セルの最高効率を競っているSolar Junction社の3接合セルは、GaInNAsを用いた格子整合系3接合である。本事業における格子整合系3接合の開発</p>

	<p>状況としては、すでに量子井戸あるいはGaInNAsミドルセル単体での性能において、最終目標とする3接合セルの効率45%を達成するのに十分な性能を実証している。したがって、現在鋭意取り組んでいる東京大学・シャープ間のウェハシャトルによる格子整合系3接合セルの実装が性能実証のためのポイントであり、平成26年度末までには最終目標を達成できる見込みである。</p> <p>一方、4接合セルに関しては、最終目標値として3接合セルを上回る変換効率48%を掲げているが、現在もっとも開発が進んでいる格子不整合系で4接合を実現するには解決すべき課題が多い。格子整合系では、GaInNAsミドルセル単体で4接合化に十分なバンドギャップ1.0eVをすでに達成しており、今後GaInNAsのもう一段の特性向上とウェハシャトルプロセスの発展により、平成26年度末までには最終目標を達成できる見込みである。なお、結晶成長プロセスの観点からは、量子井戸ミドルセルを用いた格子整合系3接合セルは1台のMOVPE装置でボトムセルからトップセルまで連続して作製可能である（東京大学で開発した量子井戸の成長技術をシャープに移転する。）。一方、GaInNAsに関してはMBEによって高性能の結晶を得ることに成功したが、MOVPEによって同等性能の結晶を得るにはさらなる研究開発が必要である。したがって、GaInNAsを用いた格子整合系多接合セルの作製には、生産性に優れたMOVPEをベースにGaInNAsのみMBEで成長するというウェハシャトルプロセス（本事業での開発ターゲット）が当面のスタンダードになると考えられる。これらのセルは、すでにモジュール実証に取り組んでいる格子不整合3接合セルに対して、コスト削減（格子整合系3接合）、変換効率向上（4接合）というメリットを有しており、集光モジュールの設計を変更することなくセルのみ置換することが可能である。したがって、まずは現在高性能を達成している格子不整合系3接合セルを用いてモジュールレベルの性能実証を推進し、その後、よりメリットの大きなセルの実用見通しが立った際にセルのみを置換することが可能となる。</p>
<p>3) メカニカルスタック トップセル・ボトムセル</p>	<p>多接合セルの表面あるいは裏面に別のセルをメカニカルスタックし、数%の変換効率向上を目指すアプローチは、新たに付加するセルがメインの多接合セルに比べて十分低コストであれば効率向上の手段として魅力的である。</p> <p>多接合セルの表面に450nmよりも短波長を吸収するInGaNトップセルをスタックするアプローチに関しては、すでに実用に十分な単セルの性能が得られている。近日中に多接合セルとのメカニカルスタックを作製し、その効果を実証する予定である。なお、このアプローチで最高の変換効率を得るためには、ベースとなる3接合セルについて青色光がなくても完璧な電流整合をとれるよう、結晶組成を若干調整する必要があるが、十分対応可能な範囲である。窒化物半導体の結晶成長はLED用途で大幅な低コスト化をすでに達成しており、メインとなるInGaP/GaAs/Ge3接合セルに比べて十分低コストで付加すべきInGaNトップセルを作製できる。なお、このアプローチは、窒化物半導体デバイスにおける世界のメッカともいえる米国UCSB大と、多接合セル発展の祖であるNRELが共同で取り組んでいるものであり、競争は激しいが、その分実用性が高い（極めてフィージビリティの高い）ターゲットであるといえる。一方、Geボトムセルの下部に設置するナローギャップセルに関しては、本事業で適切なバンドギャップで光電変換できるナノ材料の開発までは完了しており、今後多接合セルとのメカニカルスタックに必要なナローギャップセルの性能向上に継続して取り組んでいく。</p>
<p>4) InGaN多接合セル</p>	<p>シリコンボトムセル上にInGaNセルをスタックした多接合セルは、現在LED用途に開発されているシリコン基板上の低コストInGaN結晶成</p>

	<p>長・プロセス技術を応用できるため、変換効率35%程度の低コスト多接合セルとして実用上魅力的である。本目的のためにはLED用途に比べて高In組成のInGa_N結晶が必要であるが、本研究開発では独自技術であるパルススパッタ法でIn組成0.5までの高品位InGa_N結晶の成長に成功し、単セルの性能評価を行っている。実用化に向けて残る課題は、Si上のInGa_N結晶成長、InGa_Nサブセル間のトンネル接合形成であり、平成26年度末までにこれらについて技術的な見通しが得られる予定である。</p>
<p>5) 量子ドット中間バンドセル</p>	<p>平均直径24nm、面内密度$5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$を有する50層積層InAs/GaNAs歪み補償量子ドット超格子セルの開発に成功する一方、光マネジメントにより量子ドットの吸収を3倍に増強するめども立っており、量子ドット中間バンドセルに必要なデバイス構造を作製する技術は完成域に達しつつある。また、量子ドット（中間バンド）を介した2段階光吸収によるセル動作を室温で実証（世界初）しており、中間バンドセルの効率向上が着実に進んでいる。現段階では100倍集光下で20.3%が最高効率だが、これはベースとなるGaAsセルの構造最適化をする前の数値であり、セルの構造最適化により効率25%以上を現段階で達成できる見込みである。今後さらに、キャリアダイナミクスの物理的な測定に基づく量子ドット構造の最適化と、集光動作に適したセルの設計を進めることで、平成26年度末には集光下効率40%（最終目標）の達成を目指す。さらに、本事業終了後も継続して量子ドットの構造設計および結晶成長技術の改良を進めることにより、平成30年ごろには4接合セルを上回る1,000倍集光下変換効率50%以上の達成を目指している。この段階で、信頼性評価に取り組むとともに、すでに市場に浸透しているであろう集光型太陽電池モジュールのセルを多接合から量子ドット中間バンドセルに順次置き換えていくことが可能となる。これにより、モジュール効率を5%程度上積みし、45%以上にできる見込みである。なお、製造プロセスに関しては、当面はMBEによる結晶成長を考えている。MOVPEに比べて生産性は低い、中間バンドセルは多接合セルに比べて必要な層厚が1/3程度であるため、大きな問題にはならないと見込んでいる。一方、本事業の成果として得られた高効率量子ドット中間バンドセルの構造を、本事業終了後の取り組みにおいてMOVPEにより作製可能にすれば、多接合セルに比べて層厚が小さい分、生産性の高い低コストな作製プロセスを構築可能である。すなわち、量子ドット中間バンドセルは、その完成形態において、効率面で既存の多接合セルを凌駕するのみならず、多接合セルに比べて十分低コストなセルとして市場に普及できる可能性を持っている。</p>
<p>6) 量子構造挿入極薄GaAsセル</p>	<p>平成23～24年度の研究開発において、量子構造（井戸・ドット）挿入GaAsセルからGaAs基板を除去して極薄化し、裏面に光の多重反射を誘起するテクスチャを形成することで、効率30%のGaAs単セルを作製できる見通しを得た。</p> <p>平成24年5月、米国Alta Devicesが、厚さ数μmのGaAsセルにより、従来のGaAs単セルでの変換効率記録を大きく凌駕する28.3%という変換効率を実証し、新たな市場を開拓する高効率薄膜単セルとして世界中の注目を集めている。本研究開発で目指す極薄セルは、Alta Devicesのセルと極薄である点は類似しているが、量子構造を挿入して裏面テクスチャを施す点でより高度なセルであるといえる。しかし、作製コストに関してはAlta Devicesのセルと大差なく、より高効率を達成できる点で優位性を持つと考えられる。</p> <p>このような極薄セルは、GaAsを使用しているものの、基板を再利用することで原料コストの大幅低減を図っており（現在、米Microlinkが計5回まで基板を再利用する技術を開発している）、100倍程度の中規模集光システムと組み合わせることで既存のシリコンパネルに対し</p>

	<p>て十分価格競争力を持つと考えられる。一方、モジュール効率として25%は達成できる見込みであり、現状のシリコンパネルに対して、同一設置面積で2倍程度の電力が得られることは極めて大きな魅力である。したがって、太陽電池の設置可能面積に対して、より大きな発電量を要する商業施設、公共施設、さらにマンションなどの屋上設置用途に対して大変魅力的なソリューションであるといえる。</p> <p>ただし、このような中規模集光システムの有用性はごく最近認識されたばかりであり、現状では一部のベンチャー企業の試験的な取り組みにとどまっている。太陽光発電の大規模導入にむけて、このような中規模集光システムの研究開発も重要性が増すと考えられる。</p>
<p>②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発</p>	
<p>1) メカニカルスタック・デバイス化技術の開発</p>	<p>これまでの検討により低抵抗、高透過率なスタック技術の基本的技術は確立できたと考えられる。適切なバンドギャップを有するセルの組み合わせにより 20%超の効率の実現を実証し実用化の目処をつける予定である。また平成 25 年度以降に予定しているインデックスマッチング型透明導電接着剤の開発等により、光利用効果を向上し、さらなるセルの高効率化を図る。本技術の実用化をはかるには、開発した技術を簡便かつ大面積化可能な技術に展開すること、また信頼性検証を行う必要がある。大面積化に関しては一部先行して取り組んでおり、既に、破損し易い材料である Ge や GaAs の 4 インチ基板の貼り合わせに成功している。</p> <p>ヘテロ接合デバイス化技術において開発している a-Si 系ヘテロ接合層のバンドオフセット評価技術とバンドギャップ最適化技術は、現行の単結晶シリコン系ヘテロ接合太陽電池にも適用可能であり、波及効果として早期の応用が期待できる。</p> <p>フォトリソグラフィ基板の概念は材料を問わず各種薄膜太陽電池に適用可能な汎用性を持つものであり、実際にモデル材料として使った薄膜シリコン系太陽電池においては発電性能向上が確認されている。また、基板平坦性が特に重視される有機薄膜太陽電池においても有用な技術となる可能性を持つ。本コンセプトを低コストに実現する製造技術が確立できれば、速やかに実用化が進むと期待される。</p>
<p>2) ボトムセルの開発</p>	<p>SiGe 系薄膜ボトムセルの開発において、バルク基板上に開発した組成傾斜バッファ層を介して成長した膜では低い転移密度が得られており、「メカニカルスタック・デバイス化技術の開発」で実施しているヘテロ接合作製技術のようなデバイス化技術の進展により変換効率の向上が見込まれ、実用化が期待できる。なお、この組成傾斜バッファ層技術は太陽電池以外のデバイス応用においても有効と考えられ、波及効果が極めて大きいと期待される。SiGe 系薄膜作製技術として、反応性 CVD 法は構成が単純で、成膜速度も速く、大面積化も容易と考えられるので、フッ素による不純物汚染を十分に抑制できる装置設計を行えば、SiGe 系の単結晶薄膜の低温高速成長法として実用化の見通しは十分にある。</p> <p>有機単結晶合成手法として開発を進めているイオン液体を用いた高温真空下での有機薄膜・結晶の作製は、既存の溶媒-冷却法と比べて、遥かに短時間で作製することができることが確認されているが、このような高速合成は、実用化において重要な要素である。また、作製した有機単結晶・薄膜は、電界効果トランジスタによる移動度の評価から、半導体としての特性にも優れている事が実証されており、新たな有機単結晶合成法として様々な分野での実用化が見込める。有機単結晶のテンプレートとしての応用を念頭に本事業で作製に成功した種々のナノパターンガラス基板は、量産性もあり、さまざまに分野で十分に実用性があると期待される。事実、当該ガラス基板については、ガラス関連およびエネルギー関連企業からの問い合わせも受けて</p>

	<p>いる。</p> <p>半導体 CNT の大量抽出技術では純度 99wt%、抽出率 30wt%を達成しているが、高純度半導体 CNT は最先端ナノエレクトロニクス（トランジスタなど）への波及効果も期待できる。一方デバイスとしては、単一半導体 CNT で作製した素子において赤外光吸収による太陽電池動作を実証し、変換効率 4%以上を達成しているが、複数本の高純度半導体 CNT の配列制御技術、異種原子・分子内包率向上技術開発等、実用化に向けて開発すべき要素は多い。</p>
<p>3) トップセルの開発</p>	<p>量子サイズナノ結晶シリコンにおいては、自立膜の大面积化など作製技術の高度化、バンドギャッププロファイル制御、光電子特性の発現と基礎評価などの要素技術に関しては当初目標をほぼ達成した。太陽電池素子としての可能性も実証でき、ナノシリコン系としては例を見ない高い開放電圧を確認した。短絡電流密度と曲線因子が不足しているが、それらを制限している主因子は判明しており、改善する具体策もほぼ定まっているので、トップセルとしての光電変換特性の目標を達成する見通しは十分にある。</p> <p>量子ドット太陽電池に重要な 2 段階光吸収が、物理的には観測されつつあるが、変換効率の大幅な向上に寄与するほどの効果が確認されていない。実用化のためにはその実現が急務であるが、InGaP 系を用いた理想的な中間バンド太陽電池により研究の進展が期待できる。</p> <p>カルコゲナイド系化合物は、構成元素やその組成比でバンドギャップを制御できるため、多接合用トップセル材料として有望である。本事業では、Cu(InGa)(SSe)₂ や ZnCuInS₂ などの新規ワイドギャップ材料に対し系統的に太陽電池の作製と評価を実施しており、実用化に向けた高効率化のための基本技術を示せると期待している。また、開発した S 供給量の in-situ 制御技術は、多くの製膜プロセスに適用可能であり、大きな波及効果が期待される。一方、スプレー塗布法は塗布面積の調整が容易であり、これによる高効率太陽電池が実現できれば、BIPV 等さまざまな応用展開も期待される。</p>
<p>③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発</p>	
<p>a) 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽光発電システムの実用化の見通し</p> <p>これまでの研究開発により、a-Si//CIGS波長スプリッティング方式にて、1sun時22%の変換効率を達成しており、平成24年度末には低倍率集光下で25%の変換効率を達成見込みである。これらの成果をもとに、平成25年度より実用化に向けての要素技術開発を加速させる。特に、以下の項目について、研究開発を加速させる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○a-Si0/a-Si//CIGS、あるいはa-Si//CIGS波長スプリッティング低倍率集光システムの開発 ○同上、屋外暴露出力特性評価をもとにした太陽電池の最適設計 ○a-Si/μc-Si/μc-Siトリプル接合セルを用いた低倍率集光システム ○実用サイズでのモジュール化技術開発 <p>b) 薄膜フルスペクトル太陽電池の光吸収層材料の実用化の見通し</p> <p>5接合薄膜フルスペクトル太陽電池の実用化を加速させるには、現在、同時に開発を進めている各種材料系の中から、当面有望と思われる材料系を選び出し、集中的に資源を投じて研究開発を加速させる。具体的には、以下の通り。</p> <p>1層材料：a-Si0、a-Si 2層材料：Ag(InGa)Se₂ 3層材料：Ga濃度の高いCu(InGa)Se₂ 4層材料：Gaを含まないCuInSe₂ 5層材料：Cu₂Sn(S, Se)₃あるいはGe系</p> <p>さらに、Ag(InGa)Se₂やCu(InGa)Se₂を対象とした「引き剥がし技術開発」が必要である。</p>	
<p>1) シリコン系薄膜集光型セル</p>	<p>シリコン系薄膜集光型セルについては、まず、a-Si/μc-Siタンデムセルで13.6%という世界トップレベルの変換効率を得ている。また、アモルファスSi太陽電池は、集光度とともに変換効率が低下するが</p>

	<p>、a-Si/μc-Si/μc-Siトリプル接合セルでは、集光度とともに変換効率が大幅に向上する結果が得られ、平成24年度に最適設計すれば、低倍率集光で変換効率15%を得る見通しが得られている。</p> <p>また、薄膜フルスペクトル構造として、メカニカルスタック構造と波長スプリッティング構造を試作・検討し、前者で15%、後者で22%近い変換効率を達成した。特に波長スプリッティング型a-Si//CIGSセルで得られた1sun、22%は世界初、世界最高のデータであり、平成24年度、このセルに対して低倍率集光特性を測定していけば、目標値の25%を十分達成可能な状況となった。以上のように、メカニカルスタック構造と波長スプリッティング構造の両者を検討してきたが、PV開発の加速化が強く求められていることを考えれば、今後は、より波長スプリッティング構造での早急なる実用化を目指す必要がある。</p> <p>裏面透明電極作製技術については、平成27年3月までに、Ag(InGa)Se₂薄膜太陽電池などの化合物系薄膜太陽電池を用いた多接合太陽電池に応用可能な裏面透明電極作製技術を開発する必要がある。</p>
2) 広バンドギャップシリコン系薄膜	<p>広バンドギャップシリコン系薄膜 (a-SiC:H) については、信頼性に課題はあるが、これを解決できれば現行の生産設備に対して小さな負荷で適用可能であり、実用化の可能性は極めて高い。</p>
3) カルコパイライト系トップセル	<p>カルコパイライト系トップセルについては、1.7-2.0eV というワイドギャップ領域での発電を確認しており、高品質結晶成長技術、バッファ層最適設計技術などを開発することによって、薄膜フルスペクトル太陽電池のトップセルとしての実用化が期待できる。本太陽電池は、可視光の多くを透過するので、本太陽電池単体でシースルー太陽電池としての実用化も期待できる。また、本研究開発で開発するカルコパイライトの引き剥がしセル作製技術は、他カルコパイライト太陽電池の多接合化技術として、薄膜フルスペクトル太陽電池実現の要素技術としての実用化が期待できる。さらに、フレキシブル基板へ引き剥がすことで、高効率なフレキシブル太陽電池を実現することができる。</p>
4) InGaN薄膜	<p>トップセル用光吸収材料InGaN薄膜については、たいへん高品質化が難しく挑戦的な課題であり、世界的にも例のないテーマ設定となっているが、これまでに製膜プロセスの改善等を通して、4ケタ近い光感度、ならびに変換効率は0.13%と小さいが、初めて全層ワイドギャップ材料で作製したInGaN単接合セルの太陽電池動作を確認することができた。今後もさらに欠陥評価をもとにしたプロセスの最適化等により2eV程度の禁制帯幅を持つInGaNを用いた単接合太陽電池で開放電圧1.2V以上を達成することは十分期待できる。</p>
5) Si量子ドット禁制帯幅制御	<p>Si量子ドット禁制帯幅制御については、Si量子ドット太陽電池構造へのドーパント拡散抑制技術を確立するなどにより、着々と変換効率が向上しており、現状でそのまま太陽電池への実用化は難しいものの、さらなる研究進展が見込まれる。特に、低倍率集光で、開放電圧は0.649Vが得られており、将来的には、変換効率10%を達成できるところまで基礎的な研究は進展している。今後は、現状0.15μmの厚さのi層を1μm程度まで厚くする必要がある。</p>
6) ナノドット量子効果	<p>塗布プロセスによるナノドット膜においては、すでに高Voc (Voc=0.71V) が達成できており、セル構造の最適化とナノドット膜内部構造のさらなる改質により、中間目標の変換効率10% (低倍率集光時) を達成できる見込みである。本塗布プロセスによる太陽電池形成方法は、高変換効率と大幅な低コスト化の両立に繋がる可能性があり、実用化による価値創出が期待できる。</p>
7) カルコパイライト系集光型セル	<p>カルコパイライト系集光型セルについては、ワイドギャップ材料であるAg(InGa)Se₂およびミドルギャップ材料である高Ga組成Cu(InGa)S₂ともに材料の特性が明らかとなり、両者とも原料元素の製膜時にお</p>

	ける拡散制御が高品質化の鍵であることを明らかにした。現在、高温製膜に取り組んでおり、両太陽電池とも着実に効率が伸びてきている。特に開放電圧に着目すると、CIGSが0.77V、AIGSが約1.0Vまで向上し、タンデム型太陽電池の1構成素子として実用レベルに近づいている。
8) 歪Ge	歪Geについては、分子線エピタキシー法による製膜技術の確立、ならびに物性評価を終えた。現在、高開放電圧を狙ったヘテロ接合太陽電池を作製するために、バルクGeを用いて要素技術を洗い出しており、変換効率2.3%を得ている。実用化の観点では、III-V系のタンデム型太陽電池のボトムセル応用が、高吸収係数を生かした薄膜化による低コスト材料として有望ではないかと考えている。
9) 非真空CuIn(Se, Te) ₂	非真空プロセスの一つである印刷/加圧焼結法で結晶性の良いCuIn(Se, Te) ₂ 系膜等のナローギャップ化合物半導体膜の作製プロセスを確立している。このCuIn(Se, Te) ₂ 膜の製造技術は、CuIn(Se, Te) ₂ 膜以外の化合物半導体膜の作製にも適用可能であり、その適用範囲は非常に広い。そのため、本研究開発の製造技術は、低コスト化合物薄膜の製造技術として実用化が期待される。
10) 蒸着CuInTe ₂ 系セル	CuInTe ₂ 系薄膜太陽電池については、250℃というカルコパイライト系としては極めて低温で変換効率7%が得られることを世界で初めて見出した。将来、さらなる高性能化により、低温製膜およびナローギャップの特性を活かし、太陽電池を含む様々な光デバイスへの応用展開の可能性はある。
11) p型透明導電膜	Cu-Nb-OやNiO薄膜で70%以上の可視光透過率と100S/cm以上の電気伝導率を示す薄膜の作製に成功し、NiO系新材料では、約60%の可視光透過率と180S/cmの電気伝導率を達成している。今後、これらの薄膜の各種太陽電池への応用研究を行うことで、実用化への可能性を非常に高められる。また、p型透明導電膜は太陽電池以外の幅広い分野への応用も期待されているので、その波及効果は大きい。
12) フルスペクトルTCO	フルスペクトルTCOについては、従来に比べ近赤外光の透過率を大幅に改善し、近赤外のヘイズ率を大幅に向上させることが出来るようになった。今後は本TCOを大学・企業に提供し、多接合薄膜太陽電池の開発を行う。
13) グラフェン透明導電膜	グラフェン透明導電膜については、平成26年度までに透明導電膜としてのスペックの達成、太陽電池適用の原理検証を完了する。平成27年度から、製品化のためのグラフェンの大面積製膜技術および、太陽電池への適用プロセスの構築を実施することで、機能試作を完了し実用化のための技術を構築する。
14) サブセル界面接合技術	サブセル界面接合技術については、多接合太陽電池技術において高効率の太陽電池を創出する手段として有効であり、本事業の目標が達成できれば、実用化の可能性は極めて高い。
15) 光学設計技術	<p>オプティカルスプリッタについては、大面積化・量産化が容易な領域であり、スプリッタの設計が完了すれば、市販されている大型のマルチソーススパッタ装置を用いる事で量産化が可能である。また、フルスペクトル太陽電池のシステム構造にも容易に導入する事が可能であり、実用化に近い技術である。現時点でも12cm角のサンプルが作製できており、スケールアップも容易に可能で実用化に最も近い技術であると考えられる。</p> <p>今回、オプティカルスプリッタによって光吸収の波長が制限されるオールシリコンの多接合太陽電池でも通常のセルと比較して高い変換効率を得られることが確認できたのは世界でも初めてのことであり、この技術を応用することで、現在普及しているシリコン系の太陽電池を利用しても高い変換効率を実現するシステムが形成できる可能性を示す事ができた。</p>

	<p>光学制御技術に関してはプロジェクト終了後の事業化計画を想定しており、本研究開発で得られた成果より事業化・実用化研究を実施する事で次世代の高効率システム事業へのスケールアップに向けた検討が着実に進捗できる。</p>
16) 表面プラズモン	<p>金属ナノ粒子膜の局在表面プラズモン効果による、光トラッピングを含む反射と透過の光の制御によって、薄膜フルスペクトル太陽電池の電流マッチングを向上させ、高効率化が可能であることを明らかにし、特許出願も行った。本技術は太陽電池の種類を選ばず、多接合型の太陽電池全般に適用できる技術であることから、企業との連携も進んでおり、十分に実用化が期待できる。</p>
④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）	
1) 集光型多接合太陽電池評価技術	<p>本研究開発の実用化とは、開発された集光型太陽電池の屋内性能評価技術・屋外性能評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用され産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・国際競争力の醸成等に貢献することを指す。実用化の見通しとしては、汎用性の高い評価技術、具体的には様々な集光方式やシステム構造等に対応した公正かつ高精度な評価手法を開発し、開発した評価手法・実証データ等を規格委員会に提案および審議を進めることにより可能となる。</p> <p>現在、引き続き NREL と屋内・屋外性能評価技術についてデータ計測・議論・比較検証による評価技術開発検証を進めるとともに、IEC/TC82/WG7 において集光型太陽電池関連の評価に関する「集光型太陽電池発電量評価技術（IEC62670-2 Draft）」および「集光型太陽電池出力の補正技術（IEC62670-3 Draft）」の規格審議が進んでおり、産業技術総合研究所からも会議・議論に参加している。同じく IEC/TC82/WG2 と連携して、既存の平板型太陽電池評価に関する規格に集光型太陽電池に必要な内容を盛り込むための審議も「基準太陽光スペクトル下での評価（IEC60904-3）」および「太陽電池評価用ソーラーシミュレータ（IEC60904-9）」等が進んでおり、審議に参加している。これらを通して本研究開発の成果が採用され実用化される可能性は高い。</p>
2) 薄膜多接合太陽電池評価技術	<p>本研究の性能評価開発に関わる実用化とは、①と同様に開発された集光型太陽電池の屋内性能評価技術・屋外性能評価技術・信頼性評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用され産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・国際競争力の醸成等に貢献することを指す。</p> <p>革新的太陽電池開発において、ヘテロ接合界面の価電子帯および伝導帯のバンドオフセットを知ることは、デバイス構造を設計あるいは太陽電池諸特性を理解するうえで非常に重要である。従って、今回得られた成果などを基本として、各種半導体層を接合させた際のバンドアライメントライブラリーを作製することにより、革新的太陽電池の作製、太陽電池の高性能化に貢献できると思われる。太陽電池開発に特化した評価手法及び装置の実用化の可能性が期待される。</p> <p>走査型プローブ顕微鏡等を用いた薄膜多接合太陽電池の微視的評価は高性能化・太陽電池生産に直接貢献するものではないが、革新的太陽電池開発においては、ナノ構造等の微視的構造が基本的な重要性を持つ材料群が積極的に利用される傾向があり、その諸特性の基本的な理解及び性能向上に向けた指針を得ることは重要な課題である。従って、今回得られた成果などを基本として、太陽電池開発に特化した微視的評価手法及び装置の実用化の可能性が期待される。</p> <p>薄膜 X 線回折装置を用いた薄膜多接合太陽電池の材料評価におい</p>

て、高性能化・太陽電池生産に必要不可欠のものである。特に、革新的太陽電池開発においては、新概念太陽電池、例えば有機単結晶、ナノカーボン、ナノシリコン、強相関材料のセル中の結晶構造、化合物太陽電池の組成による結晶構造、メカニカルスタックによる界面構造などの精密な制御が高性能化に重要である。将来的な大量生産において、これらの太陽電池材料の構造制御によるセル化において、その生産管理に用いられると期待される。

短パルスレーザーを用いた革新的材料評価技術として、革新的太陽電池材料開発のための評価手法として、本設備を用いた超高速時間分解発光スペクトル法は、解析・評価ツールとして有効であり、今後新たな革新的材料開発・分析のための評価手法として大いに期待できる。

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）

日EUの共同研究開発により、集光型太陽光発電の研究開発の効率化と加速化が可能で、本事業の2050年ターゲット「モジュールの変換効率40%以上、電力コスト7円/kWh以下」の早期達成（2025年）に資する。

高効率・低コストの集光型太陽光発電の本格的実用化の早期達成が期待できる。平成26年度末までに、変換効率45%以上の集光型多接合太陽電池の高効率化、変換効率35%以上の集光型多接合太陽電池モジュールの高効率化に加え、集光型太陽電池・モジュールの標準特性評価技術の確立、大規模太陽光発電システム構築に向けた集光型太陽光発電システムの技術実証が可能である。さらに、集光型太陽電池用新材料、新構造の創製と評価解析が進み、高効率・低コスト太陽電池への応用が期待される。

これにより、EU提唱の20-20-20ターゲットや、日本の2020年までに1990年比25%CO₂削減のターゲットの達成への貢献が期待できる。さらには、図50に示すように、2030年には、集光型太陽電池モジュール生産量が40GWになり、大規模太陽光発電など広範な太陽光発電の導入・普及と低炭素化社会の実現に貢献することが期待される。

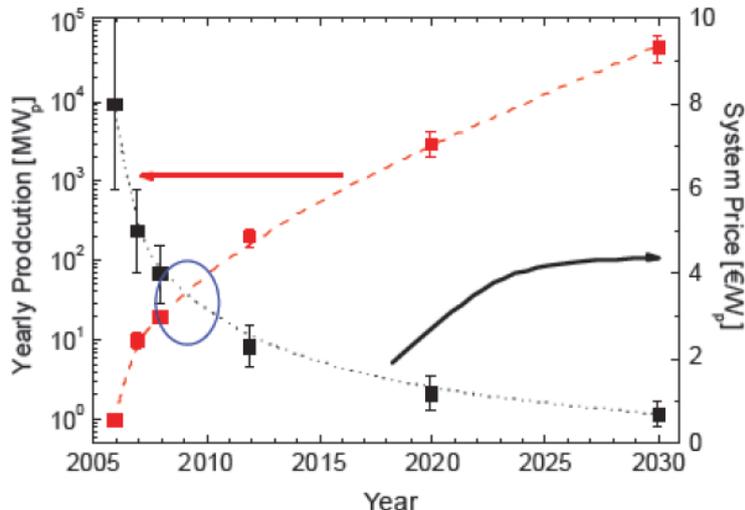


図50. 集光型太陽電池の年生産量増加シナリオ

[A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology - Report of the EU PV Technology Platform (EC, 2007)]

図 50 に示すような集光型太陽光発電の広範な導入普及のためには、集光型太陽電池・モジュール・システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化が必要である。今後、本事業の推進、後継事業の提案と推進により、集光型太陽電池変換効率 50%、モジュール変換効率 40%の実現と、モジュールコスト 40 円/W、システムコスト 100 円/W の実現を目指す。本事業と後継事業により、表 28 に示すように、2020 年頃からの本格的実用化（事業化）を目指す。表 28 には、各ワークパッケージ（WP）の連携による実用化シナリオを示す。

表 28. 各ワークパッケージ (WP) の連携による実用化シナリオ

WP (主要機関)	技術開発 内容	実用化シナリオ		
		2015	2017	2020
WP 1 (豊田工大等)	III-V-N, III-V/Si タンデム新材料セル開発	高効率新材料セル	後継プロジェクトで低コスト化	低コスト化
WP 2 (東大等)	量子・ナノ構造新型セル開発	高効率新型セル	低コスト化	低コスト化
WP 3 (シャープ等)	集光型セルの高効率化	宇宙用太陽電池として実用化	集光型セル、システムの逐次実用化	集光型セル、システムの本格的実用化
WP 4 (産総研等)	集光型セル、モジュールの標準測定技術開発	集光型セル、モジュールの標準	測定技術確立	
WP 5 (大同特殊鋼等)	集光型モジュールの高効率化	集光型モジュールの逐次実用化	集光型モジュール、システムの逐次実用化	集光型モジュール、システムの本格的実用化

1) 新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	表 1 に示すように、項目 3)、5) と連携して、本事業および後継事業を通して、集光型太陽電池、モジュール、システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化を実現し、2020 年頃からの集光型太陽光発電の本格的実用化（事業化）に貢献して行く。
2) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	表 1 に示すように、項目 3)、5) と連携して、本事業および後継事業を通して、集光型太陽電池、モジュール、システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化を実現し、2020 年頃からの集光型太陽光発電の本格的実用化（事業化）に貢献して行く。
3) 先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	逆積み 3 接合セルの実用化に向けて、量産エピ技術開発を継続し、早期に技術を確立する。実用化時のエピ生産はファンドリーを使うことも視野に入れ、ファンドリー候補先の技術情報を入手していく。逆積み 3 接合セルにおいては、シャドーロスと直列抵抗の低減により 1,000 倍以上の最大集光倍率と、45% 以上の効率を早期に実現すると共に、新規開発セルの信頼性評価を進める。また市場となる高日射地域での集光システムの実証試験（平成 24 年度試験開始予定）を通して、実用化への道筋をつける。また宇宙航空研究開発機構（JAXA）との連携を継続し、逆積み 3 接合セルの宇宙実証を行う。耐環境性などの評価試験を実施し、平成 25 年度以降に認定試験を経て国内衛星向けセルとして実用化していく
4) 集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	EU との比較測定・技術協力等により開発した信頼性の高い集光型太陽電池評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用されて産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・健全な市場醸成等に貢献することにより、実用化に貢献する。実用化の見通しとしては、様々な集光方式やシステム構造等に対応した公正かつ高精度な評価手法を開発し、開発した評価手法・実証データ等を規格委員会に提案および審議を進めることにより可能となる。
5) 高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	大同特殊鋼は、既に、2009 年に 30kW、2010 年に 100kW の集光型太陽光発電システムを設置しており、本事業の成果を用いた集光型モジュールの逐次実用化が期待できる。集光型モジュールのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化により、2020 年頃からの本格的実用化（事業化）を目指す。

2. 波及効果

本事業は、2050年までに変換効率40%超の超高効率の実現を目指し、新材料、新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術の開発を目的としている。

本事業の太陽電池分野での波及効果として、集光型太陽電池技術の宇宙用・自動車用への適用、メカニカルスタックによる多様な多接合太陽電池の出現、光マネジメントの他太陽電池への適用等の可能性がある。

また、太陽電池以外への波及効果としては、量子ドットを用いた高速通信デバイスの高度化、新規な3次元実装デバイスの出現（オプトエレクトロニクスにも展開可能）、単結晶薄膜による低コスト高性能デバイスの発展（民生応用も）、新材料の開発による多様な応用の創製、透明導電膜のディスプレイへの適用開発の可能性などがある。

なお、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

現時点で考えられる各研究開発項目毎の波及効果を以下にまとめる。

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

集光型太陽電池の本格普及は、太陽電池=半導体パネルという既存概念を打破し、太陽電池市場に新たなプレーヤーの参入を促す。

集光光学系には新概念の設計と高品質かつ低コストな機械製造技術が求められる。これは、ヘッドライト等照明器具、天体観測用の光学装置など従来太陽電池に縁がなかったメーカーの参入を促すものである。我が国には当該分野に優れた技術力を有する企業が多数存在しており、集光型太陽電池の大規模導入は我が国が世界的な技術的優位性を誇る分野における新規産業の創成、拡大の契機となり得る。

また、集光モジュールは、既存の太陽電池パネルに比べて局所に太陽光エネルギーを集中させるため、セル近傍が高温になりやすい。これは集光型太陽電池の技術課題とみなされることが多いが、逆に、太陽光発電と太陽熱利用のコジェネレーションを行う上で、極めて好ましいシステム形態であるといえる。すなわち、セルの冷却を現在主流の空冷から流体による強制冷却に改めることで、セルでの発電に用いられた残りの熱を回収し、熱電デバイスによるもう一段の発電、空調用熱源としての利用、給湯での利用など多段階のエネルギー利用を組み合わせた高効率エネルギー利用システムを構築することが可能である。このようなシステムはごく最近その重要性が認識され、未だ大規模な研究開発には至っていない。しかし、集光型太陽電池を中心に様々な技術シーズを集めてシステム化するアプローチは、再生可能エネルギー利用システムとして新たな産業を興すポテンシャルを十分に有しており、政策的な後押しが望まれる。

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

本事業の太陽電池分野での波及効果として、CISやシリコン、有機系などの薄膜太陽電池の高効率化にも有用な技術がすでに得られており、それらの分野でいち早く本研究開発で得られた技術が実用化されることが期待される。宇宙用・自動車用超高効率太陽電池への適用においても、シリコンをベースとした化合物太陽電池と組み合わせ、低コストでかつ30%を超える非集光型太陽電池の実現可能性が広がると期待される。たとえば薄膜シリコン太陽電池は単接合で11%程度の効率が得られているが、ボトムセルとして単結晶シリコン薄膜太陽電池とメカニカルスタックで組み合わせると最高で20%程度の変換効率が期待できる。単結晶シリコン太陽電池をInGaP系ワイドギャップ太陽電池と組み合わせれば30%を超える効率が期待できる。もちろんメカニカルスタック技術は汎用技術であるため、集光型太陽電池においても格子不整合系の組み合わせに活用することは可能であるし、4接合以上の多接合ではメカニカルスタック技術を導入せざるを得ないと考えられる。

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

本研究開発で開発を行ってきた低倍率集光方式は、現在、発展途上にあるⅢ-V族化合物半導体・超高効率太陽電池にも適用可能である。光マネジメント技術は、その他太陽電池系への適用等の可能性がある。新規薄膜材料からなる太陽電池は、建材一体型の高効率シースルー太陽電池への応用や、超高効率フレキシブル太陽電池の実現によるユビキタスデバイスや自動車ルーフなどへの更なる応用分野の拡大が期待される。

太陽電池以外への波及効果としては、グラフェン透明導電膜をFPD用の透明導電膜として適用することで、希少金属代替の透明導電膜を提供することが可能となる。

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

本事業の太陽電池分野での波及効果として、光マネジメント、微視的構造評価技術が他太陽電池への適用等の可能性がある。

また、太陽電池以外への波及効果としては、同じく集光系を用いる集光型太陽熱発電（CSP）開発の可能性もある。

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

集光型太陽光発電（CPV）の実証試験による CPV の完成度向上、市場拡大に向け、現行の 50kW の CPV システムに加え、新たな CPV システムの実証試験を提案して行きたい。日射条件が良いが、過酷な環境条件下での CPV の実証試験、例えば、中東地域での実証試験により、砂漠仕様の CPV セル、モジュール、システムの開発および事業化が期待できるし、日本企業参入の機会、石油産油国における市場開拓、インフラ構築への貢献が期待できる。