

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「太陽光を利用した独創的クリーン
エネルギー生成技術の創出」
研究課題「集光型ヘテロ構造太陽電池における
非輻射再結合損失の評価と制御」

研究終了報告書

研究期間 平成23年10月～平成29年3月

研究代表者：金光義彦
(京都大学 化学研究所、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

多接合・ヘテロ構造・ナノ構造を有する太陽電池の非輻射再結合損失の評価と制御を行い、それらの光エネルギー変換の高効率化の指針を得ることを目的に研究を推進した。また、マルチエキシトン生成、オージェ再結合、アップコンバージョン過程の解明など集光型ヘテロ構造太陽電池に関する重要な課題に挑戦し、基礎物理の立場から光電変換過程の全容を明らかにする研究を行った。太陽電池の時間・空間分解光学分光を金光グループが中心となっており、電界発光分光および拡張詳細平衡原理に基づく解析を秋山グループが主に行い、同一の試料を共有するなど両グループが一体となって研究を推進し、研究成果を発表した。各研究項目で得られた主な成果を以下にまとめる。

研究項目(1): 非輻射再結合速度の計測評価システムの構築と非輻射再結合過程の解明

太陽電池材料のキャリア挙動および非輻射再結合損失を定量的に評価するために、過渡光電流、過渡発光、過渡吸収をフェムト秒時間領域で評価・解析できるシステムの開発を進め、それを用いて様々な太陽電池材料(TiO_2 , CIGS, CZTSSe, ペロブスカイトなど)の単結晶・薄膜およびヘテロ構造・デバイス構造の非輻射再結合過程を含めた基礎物性の解明を行った。異なる分光計測法を用いることにより、キャリア生成・再結合の詳細を理解することに成功した。

研究項目(2): ナノ構造のマルチエキシトン生成とオージェ非輻射再結合

マルチエキシトン生成、オージェ再結合、アップコンバージョン過程の解明などナノ構造太陽電池に関する重要な課題に挑戦し、基礎物理の立場から光電変換過程を明らかにした。フェムト秒レーザーシステムを利用した時間分解発光・透過・光電流スペクトル測定および顕微分光システムにより、InAs 量子ドットおよびコロイドナノ粒子薄膜の発光および光電流を詳しく計測した。異なる最新分光技術を用いることにより、ナノ構造半導体におけるマルチエキシトン生成およびオージェ再結合を利用したアップコンバージョン過程の詳細と実際の太陽電池への応用の課題を明らかにした。

研究項目(3): 実用多接合太陽電池の非輻射再結合ロスの解析

多接合太陽電池において、各接合サブセルの結晶品質すなわち内部発光効率が多接合太陽電池のエネルギー変換効率にどのように影響するかを理論的に定式化し、そこから各サブセルの内部発光効率を踏まえた現実的な太陽電池設計指針を得た。各サブセルの内部発光効率が異なる場合の多接合太陽電池エネルギー変換効率を、詳細平衡限界理論に非輻射再結合を含むよう拡張することで定式化した。その数値計算からエネルギー変換効率へのサブセル内部発光効率の影響や特徴を定量抽出し、それを基に多接合太陽電池の現実的な設計指針を提案した。多接合太陽電池のサブセル動作性能評価方法として、太陽電池に順方向バイアスを印加した発光ダイオード(LED)動作時の電界効果発光の絶対光量計測と定式化した拡張詳細平衡関係式による解析を用いた手法を開発した。実際に衛星用 InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池へと適用し、その有効性を検証した。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 新しい太陽電池材料の基礎光学物性の解明

概要:

過渡光電流、過渡発光、ならびに過渡吸収を評価・解析できるシステムの開発・改良を進め、それらの異なる測定手法を併用することにより、新しい太陽電池材料である $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ のバンドギャップエネルギー等を決定することに成功した。また、太陽電池半導体材料の単結晶、薄膜、さらにはヘテロ接合薄膜のキャリア再結合過程、キャリア緩和過程を明らかにし、太陽電池設計において重要となるバンドギャップエネルギー近傍の光学応答を解明した。

2. ナノ構造半導体太陽電池のマルチエキシトン生成とアップコンバージョン過程の解明

概要:

InAs 量子ナノ構造を作製し、母体結晶のバンドギャップエネルギーより小さなフォトンエネルギーをもつ赤外光による光キャリア生成過程を研究した。浅いエネルギー準位の量子ディスク構造ではオージェ過程によりキャリア生成が起こり、その効率は高いことが分かった。詳細平衡理論の拡張により、量子ドット太陽電池が大きな発生電圧ロスを起こし十分な効率向上が達成できていない事実に対して、基礎物理的な説明を与えることに成功した。また、電気伝導性を有するコロイドナノ粒子薄膜の作製に成功し、マルチエキシトン生成(1光子多電子変換)に起因する光電流増幅の観測に成功した。

3. 時間分解発光法により多接合太陽電池のキャリア挙動の解明

概要:

時間分解発光分光により得られる発光緩和曲線を測定・解析することにより、多接合太陽電池の各サブセルの電気特性を評価できる手法を提案・実証した。発光寿命の光励起強度依存性および発光スペクトルを測定することにより、最大電力点(動作点)でのキャリア挙動を明らかにした。単接合および多接合電池の光電流生成効率やサブセル間の発光結合などの情報が得られることを示し、今後簡単な評価法としての幅広い利用が期待される。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 電界発光の絶対量子収率の計測による多接合太陽電池の定量評価の確立

概要:

光吸収とその逆過程である発光との相反関係を利用し、太陽電池を発光ダイオード(LED)動作させた時の各サブセルのエレクトロルミネッセンス(EL)の絶対発光効率測定から、多接合太陽電池のサブセル特性を評価する解析手法を開発した。InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の特性評価に適用し、サブセルの定量的評価に成功した。その解析からは各サブセルの I-V や多接合での変換効率を算出することができた。EL の解析結果は実測値とよく一致しており、本手法がサブセル動作特性診断に有効であることを証明した。この実験方法・解析方法を新しい太陽電池評価方法として、製品化に成功した。

2. 詳細平衡原理に基づく多接合太陽電池の効率評価方法の確立

概要:

多接合太陽電池の各サブセルに非輻射再結合ロスが存在する場合、それがどのように太陽電池全体のエネルギー変換効率の低下を引き起こすかを定量的に理解するために、詳細平衡理論を拡張して定式化した。2 接合以上の多接合太陽電池において、サブセルを構成

する半導体材料の品質（発光の内部量子効率）が全体の太陽電池エネルギー効率に及ぼす効果を、具体的にかつ詳細に計算した。非輻射再結合ロスが存在する現実の材料を用いた時の多接合太陽電池の設計指針を明確に示すことに成功し、今後の実用材料の選択に重要な指針を与える成果である。

3. 時間・空間分解光学計測による特性評価とヘテロ構造太陽電池の劣化機構の研究

概要：

ペロブスカイトヘテロ構造太陽電池の発光と光電流の時間空間分解測定を同時に行うことにより、界面でのキャリア注入過程を明らかにすることに成功した。光電流強度、発光強度および発光寿命が空間的に揺らいでおり、この空間的不均一性は界面でのキャリア分離・注入効率の揺らぎに起因する。長時間光照射した領域ではキャリア注入効率の低下が起こり電池の効率低下が起こることがわかった。この分析方法は他の多接合ヘテロ構造電池にも適用でき、効率向上・劣化防止などの実用的課題解明に利用できると期待される。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「金光」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
金光 義彦	京都大学 化学研究所	教授	H23.10～H29.3
井原 章之	同上	助教	H23.10～H29.3
田原 弘量	同上	助教	H27.6～H29.3
山田 泰裕	千葉大学 大学院理学研究科	准教授	H23.10～H29.3
岡野 真人	慶応義塾大学 理工学部	講師	H23.10～H29.3
David M. Tex	京都大学 化学研究所	研究員	H24.4～H28.11
Phuong Quang Le	京都大学 化学研究所	研究員	H25.4～H28.3

研究項目

- ・非輻射再結合速度の計測評価システムの構築と非輻射再結合過程の解明
- ・ナノ構造のマルチエキシトン生成とオージェ非輻射再結合
- ・実用多接合太陽電池の非輻射再結合ロスの解析

②「秋山」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
秋山 英文	東京大学 物性研究所	教授	H23. 10～H29. 3
合田 友子	東京大学 物性研究所	事務補佐員	H23. 10～H29. 3
望月 敏光	産業技術総合研究所	研究員	H23. 10～H26. 3
吉田 正裕	産業技術総合研究所	主任研究員	H25. 4～H29. 3
金 昌秀	東京大学 物性研究所	特任研究員	H23. 10～H29. 3
陳 少強	華東師範大学	教授	H23. 10～H29. 3
伊藤 隆	東京大学 物性研究所	特任研究員	H23. 10～H29. 3
朱 琳	東京大学 物性研究所	特任研究員	H24. 4～H29. 3

研究項目

- ・非輻射再結合速度の計測評価システムの構築と非輻射再結合過程の解明
- ・ナノ構造のマルチエキシトン生成とオージェ非輻射再結合
- ・実用多接合太陽電池の非輻射再結合ロスの解析

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について
他大学、国立研究機関をはじめ一部産業界とも連携し研究開発を行っている。一部はすでに学術論文として成果発表済みである。

§ 3 研究実施内容及び成果

3. 1 非輻射再結合速度の計測評価システムの構築と非輻射再結合過程の解明

(金光グループ、秋山グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

①研究のねらい・方法・実施内容

太陽電池材料の非輻射再結合損失を定量的に評価するために、過渡光電流、過渡発光、ならびに過渡吸収をフェムト秒時間領域で評価・解析できるシステムの開発を進め、それを用いて様々な太陽電池材料の非輻射再結合過程を含めた基礎物性の解明を目指す。多接合太陽電池、集光型太陽電池や量子・ナノ構造太陽電池の基礎物理を知り、効率向上の指針を得ることを目的として研究を行った。

ヘテロ構造・ナノ構造・多接合を有する太陽電池材料における非輻射再結合速度を計測できる分光評価システムの構築を行った。独自の光学測定系やソフトウェアを構築・改良し、高出力あるいは高繰り返しフェムト秒パルスレーザーと組み合わせて使用した。高繰り返し、高感度、広範囲の波長領域で測定できる時間分解分光計測システムおよび顕微分光システムの安定的・効率的な利用に努め、実用太陽電池材料、ナノ構造太陽電池材料の基礎物性・非輻射再結合過程の評価に活用した。

②成果とその位置づけ・意義

時間分解発光分光・過渡吸収分光・光電流分光・テラヘルツ分光などの異なる測定手法を組み合わせることで、様々な太陽電池材料の光電特性や非輻射再結合損失過程を明らかにした。その主な成果とその意義について以下にまとめる。

(i) TiO_2 : 二酸化チタンは、色素増感型太陽電池材料や光触媒材料として優れた性質を示し、太陽光エネルギーを有効活用するのに必要不可欠な材料である。 TiO_2 の光キャリアダイナミクスは、光電変換効率を決定する重要なファクターであり、その理解は太陽電池の開発において重要な課題である。最近では、ペ

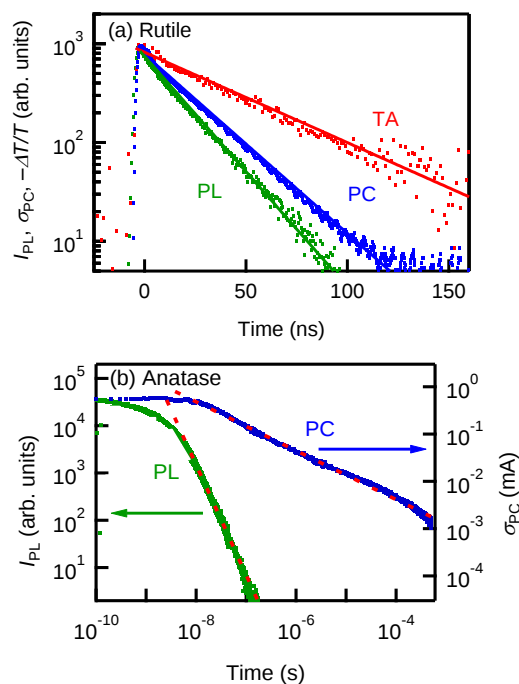


図 1. (a) ルチル型構造における PL, PC, TA の減数曲線。ナノ秒の指数関数減衰を示す。(b) アナターゼ型の非指数関数的な減衰。

ロブスカイト太陽電池の変換向上を支配する電子輸送層としてそのキャリア挙動の詳細な理解が求められている。

時間分解(PL)・光伝導(PC)・過渡吸収分光(TA)を組み合わせることで、ルチル型およびアナターゼ型結晶の電子および正孔寿命を決定することに成功した(図1)。ルチル型においては、電子と正孔の緩和ダイナミクスは単一指数関数によって記述され、その寿命はともに数 10 ナノ秒程度であった。一方アナターゼ型二酸化チタンにおいては、非指数関数型の緩和ダイナミクスを示した。これは、アナターゼ型のキャリア再結合は、マルチキャリアトラッピング過程が支配的であることを示唆している。また、アナターゼ型では、正孔に比べて電子の寿命は極めて長かった。光吸収スペクトル、発光励起スペクトル、光電流スペクトルはそれぞれ異なる形状をしており、結晶内でのキャリア緩和の違いを反映している。PL、PC、TA このような光キャリアダイナミクスの違いがルチル型とアナターゼ型における光起電力効果や光触媒反応の違いを決めていると考えられる。

(ii) $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS): CIGS は可視光領域から近赤外領域において大きな吸収係数を持っており、作製が比較的容易な多結晶構造である。多結晶薄膜太陽電池としては世界最高クラスの値である 20%以上の光電変換効率が CIGS 薄膜太陽電池において実現されている。欠陥や結晶粒界が存在する CIGS 多結晶薄膜における自由キャリアのエネルギー緩和および再結合ダイナミクスを初めて明らかにした。

図 2 に、今回解明した CIGS における光生成キャリアの様々な緩和過程の時定数をまとめた。試料としては同時蒸着法によってソーダライムガラス基板の上に直接成長した膜厚 200 nm の CIGS 薄膜試料を用いた。過渡吸収測定と時間分解発光測定と比較から、10ps 程度で欠陥準位への緩和が起こっているにも関わらず、光キャリアが数ナノ秒にも及ぶ長い時間バンド内に存在すること、100ps でバンド間遷移が起こることを初めて突き止めた。さらに過渡吸収ダイナミクスのポンプ光エネルギー及びポンプ光強度依存性から、バンド内緩和時間が 0.5~1ps 程度と比較的遅いことを明らかにした。これは、CIGS の特徴の一つであるバンド端のポテンシャル揺らぎによるキャリア間散乱の抑制を反映しており、効率良い電荷分離が起こっていることを示唆している。このような光キャリアの長い寿命や遅いバンド内緩和という特徴的な光キャリアの振る舞いが、CIGS の高い光電変換効率の主要原因であると結論した。同様にハロゲン化鉛ペロブスカイトでもホットキャリアの遅い緩和が観測され、複雑な構造の半導体の遅い緩和過程が高効率電池の要因の一つであることを示した意義は大きい。特に、異なる物質を比較することにより明らかとなった点である。

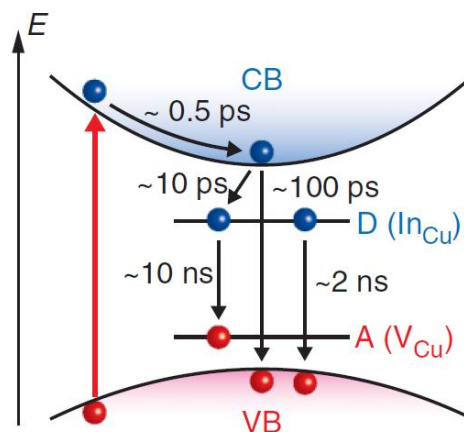


図 2. CIGS 薄膜におけるキャリア緩和時定数の決定。

(iii) $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS): 多元混晶半導体である $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)は、レアメタルや毒性元素を含まないことや、可視光から近赤外光領域まで幅広く大きな吸収係数を持つことが

ら、新しい太陽電池材料として期待されている。しかし、CZTS の変換効率は同じ多元混晶半導体である CIGS に比べて極めて低い。CZTS と CIGS の基礎物性の比較・検討は、多結晶薄膜太陽電池の効率向上にとって重要である。

CZTS 単結晶に対して発光、発光励起、光伝導および過渡反射分光を行い、バンドギャップエネルギーを 1.58 eV と決定するとともに、光生成されたキャリアの局在と再結合過程を明らかにした(図3)。また、光キャリアの緩和過程においてバンドテイル状態が重要な役割を示していることを明らかにした。100K 以下の低温とそれ以上の温度では、キャリア再結合過程が異なることが分かった。特に室温近傍では非輻射再結合速度が非常に大きくなり、これが CZTS のエネルギー変換効率の低い原因の一つである。光キャリア生成効率の励起波長依存性より、表面での非輻射再結合過程が光電流の大きさを決定していることも明らかとなり、Na ドーピングにより光電特性の改善が見られた。しかし、キャリア寿命が短く、大きな拡散長を得ることが困難であり、高効率化にはさらなる工夫が必要である。

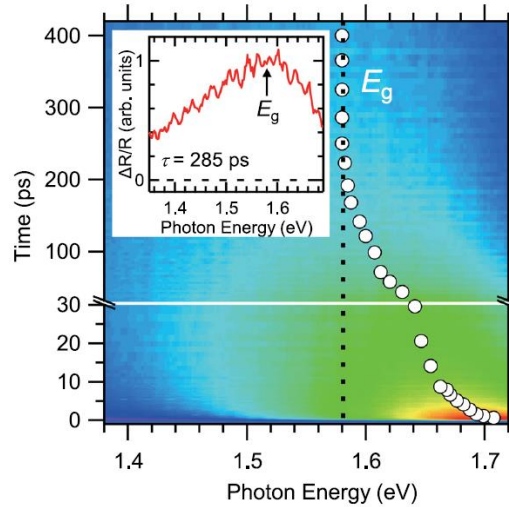


図3. CZTS 単結晶における自由キャリア緩和。高速の緩和と遅い緩和により、バンドギャップエネルギーを決定。

(iv) $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZTSSe):

$\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZTSSe) は非常に多くの欠陥が形成されやすい構造を有しており、実際に単結晶においてもバンド端以下に大きなバンドテイル(アーバックテイル)が存在する。複雑な多元系薄膜太陽電池材料のキャリア挙動をエネルギーロスとなる非輻射再結合過程の解明を目指して分光研究を行った。特に、様々な最先端分光技術(過渡反射及び THz 分光法など)を駆使し、それらの分光結果を比較することで、CZTSSe 単結晶における自由キャリアの寿命を初めて正確に評価することに成功した。図4に示すように CZTSSe などの多元混晶の発光は大きなストークスシフトを持つ局在準位からのものであるにもかかわらず、発光の時間変化より自由キャリア寿命が推論されており、自由キャリア挙動に関して理解がほとんど進んでいなかった。CZTSSe の Se 組成を変化させるとキャリア寿命は大きく変化

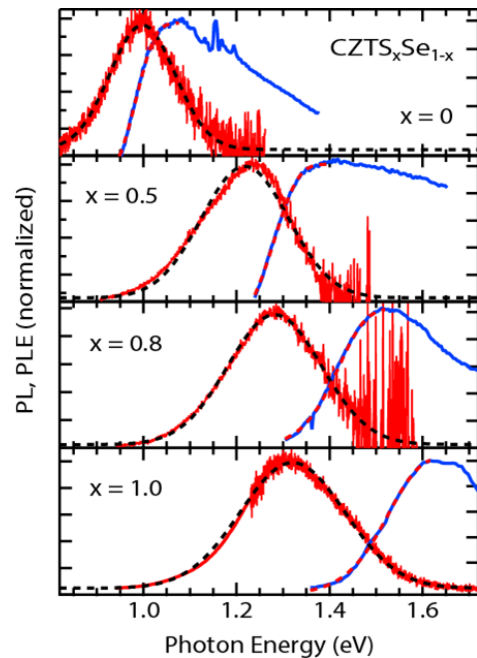


図4. $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ 単結晶の発光および発光スペクトル。

した。Se の比率が大きくなるとアーバックテイルは小さくなるが、自由キャリアの寿命は短くなることを見出した。さらにNaドーピングすることによりCZTSSeのキャリア寿命は長くなることがわかり、電池の光電特性の改善に利用可能であることを示した。新しい分光技術(過渡反射及びTHz分光法など)を利用することにより、これまでに全く不明であった自由キャリアの寿命を正確に決定することに成功した。

(v) ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体: 研究開始後、全固体型太陽電池の新しい材料として鉛ハライドペロブスカイト半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) が登場した。この半導体は、低い作製コスト・高い変換効率・高いフレキシビリティを兼ね備えた新しい太陽電池材料として近年注目が集まっている。ペロブスカイト太陽電池の変換効率は急激に向上しており、現時点で22%にまで到達している。このような高い変換効率の鍵となる物理的なメカニズムの解明は重要な課題であり、そのためには詳細な光学特性の理解が必要不可欠である。鉛ハライドペロブスカイト半導体を作製し、その光学特性を研究した。様々な分光手法(拡散反射・発光・光伝導・過渡吸収測定)で研究し、バンドギャップエネルギーを1.61eVと正確に決定した。構造の不均一性による大きなバンドテイルの存在が明らかとなった。さらに、時間分解発光分光およびフェムト秒過渡吸収分光により光励起状態の緩和ダイナミクスの研究を行った。図5に示すように、発光や過渡吸収信号の減衰カーブは、光励起強度とともに大きく変化した。励起直後の発光強度は励起光強度の二乗に比例して増大しており、このことは発光の起源が電子と正孔の二体衝突型の輻射再結合であることを意味している。また、緩和ダイナミクスは励起光強度に強く依存しており、電子と正孔の二体輻射再結合と一電子トラップ過程を考慮した単純なレート方程式で記述できることを明らかにした。これらの結果は、室温では光励起によって生成した電子と正孔は自由キャリアとして振る舞っており、励起子を形成していないことを明確に示している。これらに加え、直接遷移型半導体であることや輻射再結合速度がGaAsと同程度と大きいことの発見は、ペロブスカイト太陽電池の最適なデバイス設計を行う上で極めて重要な知見である。現時点では、光照射や空気中での劣化をいかに防ぐかが課題である。このことは後程議論する。

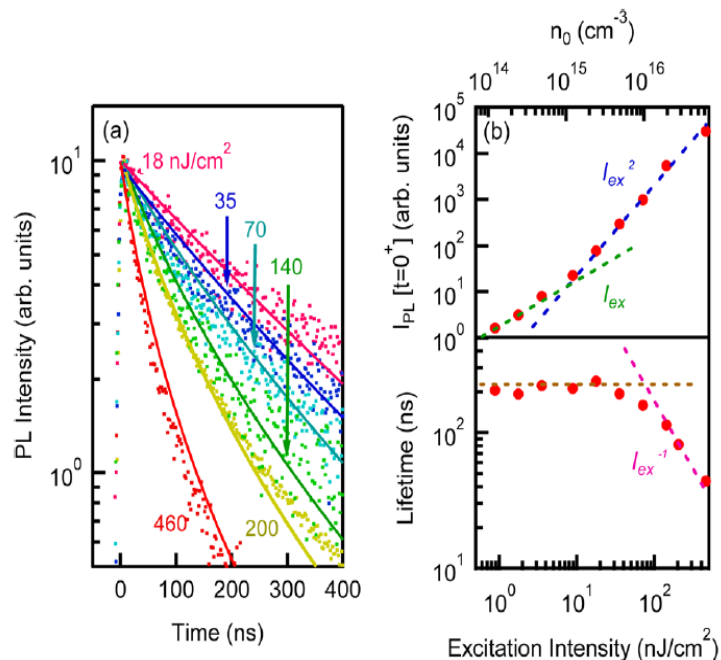


図 5. (a) $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ における異なる励起強度における発光ダイナミクス
(b) 発光強度と寿命の励起強度依存性。

さらに、ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体の単結晶を作製し、その光学特性を研究した。薄膜試料に比べ単結晶試料の発光ダイナミクスは大きく異なることが分かった。薄膜試料では発光のスペクトルは緩和時間とともに変化しないが、単結晶試料では発光スペクトルのレッドシフトが時間分解測定により観測された。このレッドシフトは試料内部を励起する 2 光子励起では観測されない(図 6)。単結晶表面を光励起することにより、キャリアの高速拡散が起きることが分かった。

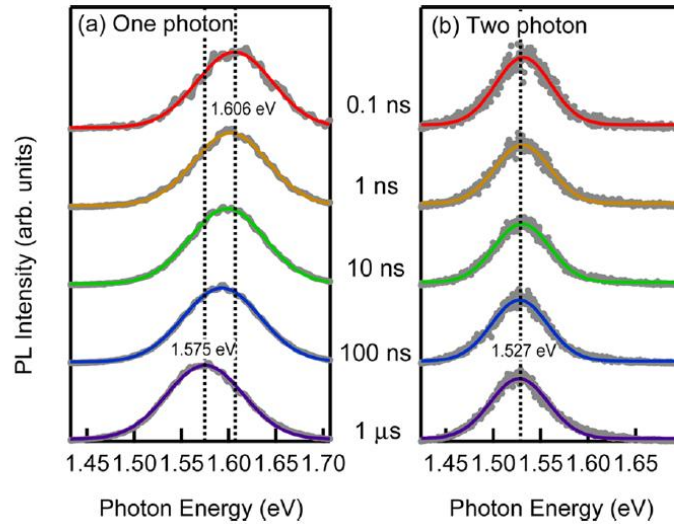


図 6. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 単結晶の発光スペクトルの時間変化 (a) 1 光子励起および (b) 2 光子励起。

さらに、1 光子励起と 2 光子励起の場合の発光スペクトルが異なることにより、発光の再吸収(フォトンリサイクリング)が起こっていることを明らかにした。実際に拡散とフォトンリサイクリング(発光と再吸収の繰り返し)を考慮した発光モデルによる数値計算により、実験結果をうまく説明できることを示した。太陽電池のような厚い半導体を利用したデバイス、特に直接遷移型半導体では、フォトンリサイクリングが重要となる。図 7 に示すように、厚い単結晶では、2 光子励起による発光は低エネルギーに現れる。発光・再吸収を繰り返すことにより、低エネルギーの発光のみが表面から放出される。さらに、フォトンリサイクリングのメカニズムを解明するために、フェムト秒 2 光子顕微鏡を完成させ、発光スペクトルの時間変化を計測し、定量的な詳しい議論を行うことができた。

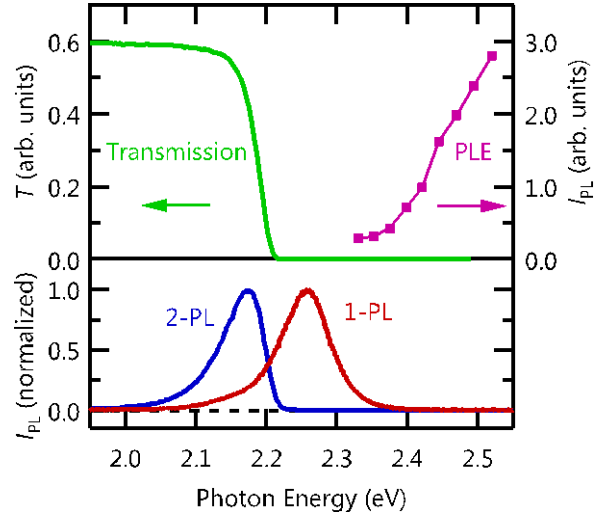


図 7. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶の 1 光子励起と 2 光子励起の発光スペクトル

(vi) 新しい光電流分光法の開発:

太陽電池の V_{oc} 低下や劣化の原因となり、光キャリアの生成・緩和や伝導過程を支配するバンドギャップ内局在状態を明らかにするために、位相ロックパルスを用いた新しい光電流ビート分光法の開発を行った。光電流ビート分光法では、相対位相を固定した 2 本の光

パルス(位相ロックパルス)を用いて時間的な電流変化を測定することで、局在準位を高精度に捉えることができる。干渉測定により、通常のポンプ・プローブ分光よりも精度高く緩和ダイナミクスを測定できる(図8)。この手法を用いて、GaAs 単結晶および $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜の局在準位のエネルギーを正確に求めることに成功した。これまで幅広く利用されてきたPL法とは異なり、発光しない欠陥準位も検出でき、発光分光と併用することにより局在準位の解明に力を発揮するものと期待している。特に、光電流を利用しているために太陽電池研究に幅広く利用できるものと期待される。

中間バンド型太陽電池の実現のためには、アップコンバージョン効率を決定するInAs 量子ドット中の光キャリア再結合ダイナミクスの解明が必要である。我々はフェムト秒励起相関法(FEC)を応用し、光伝導ダイナミクスをフェムト秒時間分解能で測定できる光伝導励起相関法(PC-FEC)を開発した。これを用いて、InAs ナノディスク・量子ドットにおけるアップコンバージョン過程におけるオージェイオン化の重要性を明らかにした。

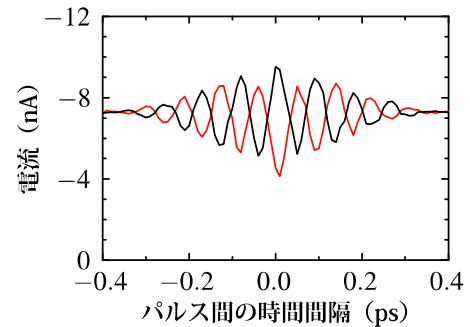


図 8. GaAs の光電流ビート分光の例

3. 2 ナノ構造のマルチエキシトン生成とオージェ非輻射再結合

(金光グループ、秋山グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

①研究のねらい・方法・実施内容

マルチエキシトン生成、オージェ再結合、アップコンバージョン過程の解明などナノ構造太陽電池に関する重要な課題に挑戦し、基礎物理の立場から光電変換過程の全容を明らかにする。特に、中間バンド型太陽電池およびマルチエキシトン型太陽電池の問題点と可能性を整理・解明し、実用化への道筋を議論する。

最適な太陽電池材料の一つである GaAs や AlGaAs 結晶中に InAs 量子ディスクならび量子ドットを含有した薄膜および化学的手法により作製したナノ粒子量子ドット薄膜を試料として用いた。フェムト秒レーザーシステムを利用した時間分解発光・透過・光電流スペクトル測定および顕微分光システムにより、それらの試料の発光および光電流を詳しく計測した。異なる最新分光技術を用いることにより、ナノ構造半導体におけるマルチエキシトン生成およびオージェ再結合を利用したアップコンバージョン過程を研究した。

②成果とその位置づけ・意義

量子ドット・ナノ粒子を活用した新しい太陽電池として期待されている中間バンド型太陽電池とマルチエキシトン太陽電池の基礎物理の理解を課題として取り上げ、その問題点を明らかにした。その主な成果とその意義について以下にまとめる。

(i)中間バンド型ナノ構造(量子ディスク・量子ドット):母体結晶のバンドギャップ内に新たな光学遷移が可能な中間バンドを形成し、それを利用することに

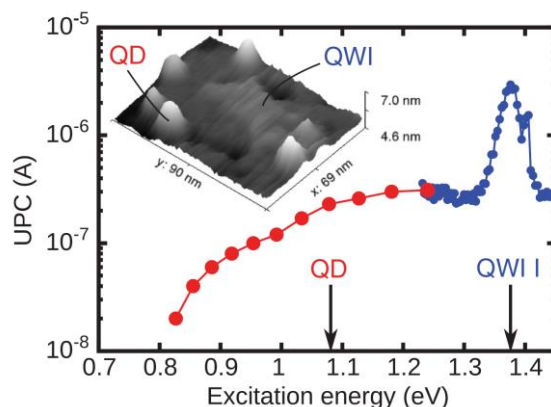


図 9. 量子ナノディスク(QWI)および量子ドット(QD)からのアップコンバージョン光電流

より光電流を増幅させエネルギー変換効率を向上させる太陽電池に中間バンド型太陽電池がある。これは、母体結晶のバンドギャップ内に量子ドットの局在準位を形成させ利用するのが一般的である。従来の研究は、価電子帯から中間バンドさらには中間バンドから伝導帯へと2段階の光吸収により電流増幅を得るものであるが、我々はナノ構造におけるオージェ過程により生成されるホットなキャリアの利用(アップコンバージョン過程)を提案・実証した。

InAs は GaAs あるいは AlGaAs との格子不整合が大きく、2次元的なウェッティング層、平坦な量子ディスク(QWI)、ピラミッド状の量子ドット(QD)が作製できる。これらの量子構造のエネルギー準位は GaAs や AlGaAs のバンドギャップエネルギーよりも低いために、量子構造内に光生成されたキャリアを GaAs や AlGaAs に取り出すことができれば、光電流を増加させることができる。図9に示すように浅いエネルギー準位の InAs 量子ディスク構造では、深いエネルギー準位の量子ドットに比べより効率高くアップコンバージョン電流を発生させることが分かった。

同じ試料に対して顕微分光システムによって同時に発光と電流を測定しその空間マップを作成した。その結果を図10に示す。量子ディスクおよび量子ドットは、レーザーの励起波長を変えることで共鳴励起することができる。量子ディスクでは、発光と光電流の間に正の相関関係が現れ、効率高く光電流が生成されることがわかった。アップコンバージョン光電流の温度依存性さらにはフェムト秒時間分解測定により、オージェイオン化過程で光電流が生成されることを明らかにした。一方、量子ドットを励起した場合には、量子ドットからの光電流は小さく、他の量子構造がキャリアのトラップまたは再結合中として働いていることが示された(発光と光電流に相関関係がない)。

高いエネルギー変換効率が期待されているにも関わらず、量子ドットの実際の変換効率は非常に低い。その原因を明らかにするために、多波長レーザー励起分光を行った。異なる波長の光を同時照射することにより初めて観測される電流の増加量を解析した。この多波長レーザー励起分光により、量子ディスクと量子ドットの間エネルギー移動が起こり、

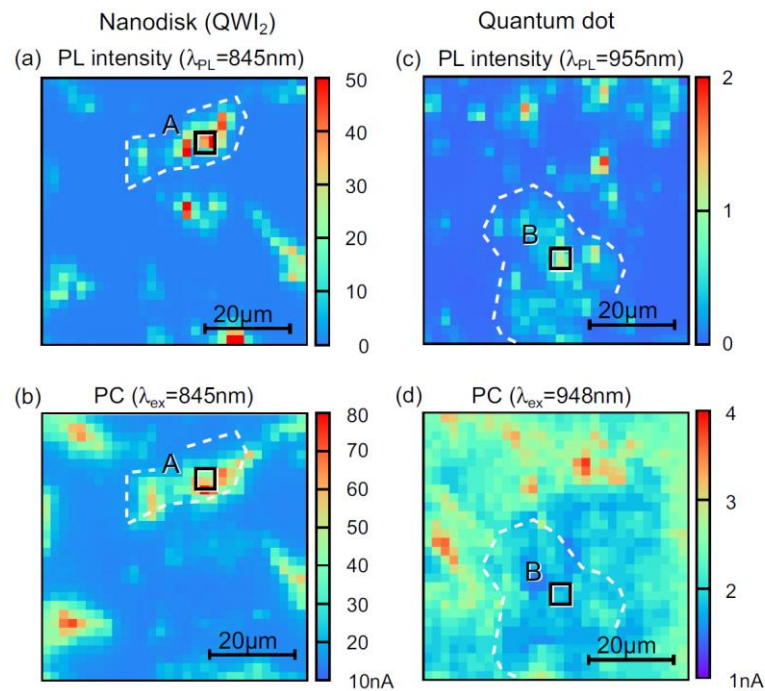


図10. 量子ナノディスクおよび量子ドットからの発光(PL)と光電流(PC)の顕微分光。量子ドットでは、PLとPCは負の相関がある。

光電流生成効率を下げるということが分かった。すなわち、エネルギー準位の異なる量子構造間のキャリア移動が光キャリア生成に重要であり、量子ドットからの光電流を得るには、量子ドットを光励起キャリアで占有させておく必要がある。量子ドットのアップコンバージョン電流を大きくするには、光吸収の増大のみでなく、他の準位へのエネルギー緩和を抑制することが重要であることを見出した。

これまでに中間バンド型量子ドット太陽電池に関する数多くの研究があるにも関わらず、太陽電池の効率は向上していない。これは、量子ドットが光キャリアの生成中心と働くとともに、キャリアトラップ・再結合中心としても働くことを、量子ドット密度を変化させた試料を用いた実験で明らかにした。 V_{oc} の低下が深刻な問題であることを以下の計算とともに明確にした。

(ii) ショックレー・クワイサー理論による中間バンド太陽電池の変換効率:

詳細平衡限界理論は、太陽電池の吸収スペクトルを与えれば、変換効率の上限値の見積を教えてくれる。我々は、詳細平衡限界理論を用いて、量子構造太陽電池の変換効率上限値を計算した。モデルでは、母体材料はバンドギャップが E_g で十分厚く、 E_g 以上の光子エネルギーの光を確率1で吸収する一方、母体材料に付加された量子ドットなどの量子構造は、束縛エネルギー E_b をもち、 $E_g - E_b (=E_1)$ から E_g の間の光子エネルギーの光を吸収率 a_1 で吸収する設定とした。簡単のため 6000K 黒体放射 1sun の太陽光スペクトルを仮定した。

ここでは、 E_g が 1.4eV、内部発光効率を 1 の結果を示す。 E_b が小さい場合や吸収率 $a_1=0$ の場合は、当然、 $E_g=1.4\text{eV}$ のバルク太陽電池の変換効率の約 30%をとる。 E_b が 0.1eV 以上では、変換効率は、吸収率 a_1 が増加すると急激に低下した後、徐々に増加し、吸収率 $a_1=1$ の場合、すなわちバンドギャップ $E_g - E_b (=E_1)$ のバルク太陽電池の変換効率に近づいてゆく。

短絡電流 J_{sc} は、初期値 $26\text{mA}/\text{cm}^2$ から線形増大する。開放電圧 V_{oc} は、 E_b が 0.1eV 以上の場合、吸収率 a_1 が増加すると、初期値 1.2V から急激に E_b 程度低下し、その後、ほぼ一定値をとる。変換効率の変化は、短絡電流 J_{sc} と開放電圧 V_{oc} の積として、おおよそ理解できる。

これらの計算結果は、報告されている量子ドット太陽電池の実験データの特徴、すなわち、量子構造の導入により短絡電流 J_{sc} は僅かに増大するが、開放電圧と変換効率がバルク参照試料よりも著しく低く出てしまうという経験事実を良く説明する。すなわち、量子ドット太陽電池の開放電圧と変換効率の低下は、材料品質や移動度の低下によるものではなく、ステップ状のバンド内吸収スペクトルを持つ太陽電池が負うべき必然的性能である。量子ドットなどの量子構造を、中間バンド・アップコンバージョン太陽電池に利用する場合、赤外光吸収増加の恩恵を生かすには、上記の本質的な開放電圧低下に打ち勝つレベルまで高める必要がある。

(iii) ナノ粒子におけるオージェ非輻射再結合とマルチエキシトン生成:

ひとつの光子から複数の電子・正孔ペアが生成できるマルチエキシトン(MEG)過程を利用した高効率光キャリア生成は、コロイドナノ粒子で活発に研究されている。半導体ナノ粒子内に閉じ込められたキャリア間には強いクーロン相互作用が働く。この強い相互作用により、三体のキャリア衝突である非輻射オージェ再結合が高い効率で起こる。オージェ再結合の詳細を明らかにする目的で、SiGe ナノ粒子の過渡吸収測定を行った。過渡吸収信号の時間変化は、サイズ分布を考慮した量子化オージェ再結合モデルによって説明できた。また、Si ナノ粒子よりも SiGe 混晶ナノ粒子のオージェ再結合効率は増大することを明らかにした。SiGe ナノ粒子のオージェ再結合効率は温度に依存しなく、バルク結晶におけるフォノン介在のオージェ再結合過程とは異なることが分かった。以上の結果は、量子閉じ込めによる波数保存則の緩和により、ナノ粒子の量子化オージェ再結合速度は増大することを示している。

ナノ粒子のマルチエキトン生成(MEG)は、溶液中の孤立したナノ粒子を試料にしたフェムト秒ポンプ・プローブ実験がほとんどであった。実用展開の観点から、Si および SiGe のナノ粒子固体薄膜におけるオージェ再結合過程およびその逆過程である MEG 過程の詳細な研究を行った。バルク結晶に比べナノ粒子のバンドギャップエネルギーは大きくなっているにもかかわらず、ナノ粒子の MEG の閾値は小さくなる。ナノ粒子固体薄膜での高効率 MEG が明らかとなった。

実用塗布型光電変換デバイスを実現するためには、効率的に光電流を取り出せる電気伝導性ナノ粒子固体薄膜の開発が必要不可欠である。そこで、表面配位子処理によって粒子間距離を制御した薄膜の実現を目指した。粒径 3.2nm の PbS ナノ粒子分散液(初期配位子:オレイン酸)を基板上に塗布した後、低分子量の配位性化合物(アミン、チオール、ハロゲン、チオシアネート等)溶液にナノ粒子膜を浸漬させる配位子交換処理により、粒子同士を近接化させた薄膜を得た。低分子量のアミン系化合物やチオシアネ酸カリウム(KSCN)による配位子交換処理を行った。高い電気伝導性を示すナノ粒子薄膜では、粒子間のトンネル伝導が支配的であることを明らかにした。ナノ粒子薄膜における光電流の照射光子エネルギー依存性より、表面処理を行なった薄膜における MEG 効果による光電流増幅の観測に成功した(図 11)。

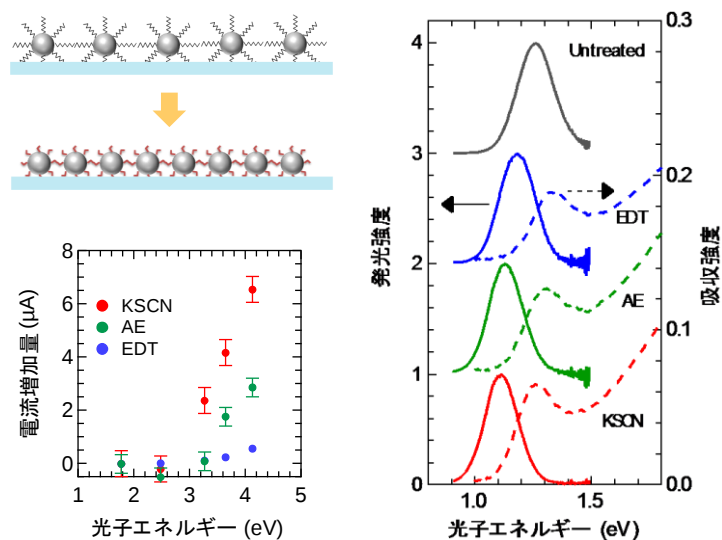


図 11. PbS ナノ粒子の表面配位子を変化させた時の吸収・発光スペクトルと MEG による光電流増幅。

3. 3. 実用多接合太陽電池の非輻射再結合ロスの解析 (秋山グループ、金光グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

①研究のねらい・実施方法・内容

多接合太陽電池において、各接合サブセルの結晶品質すなわち内部発光効率が多接合太陽電池のエネルギー変換効率にどのように影響するかを理論的に定式化し、そこから各サブセルの内部発光効率を踏まえた現実的な太陽電池設計指針を得る。合わせて、多接合太陽電池における各サブセルでの非輻射再結合によるエネルギーとキャリアの損失やそのサブセル動作特性の定量評価手法を開発し、実際の多接合太陽電池試料のサブセル性能診断へと活用する。

②成果とその位置づけ・意義

各サブセルの内部発光効率が異なる場合の多接合太陽電池エネルギー変換効率を、詳細平衡限界理論に非輻射再結合を含むよう拡張することで定式化に成功した。その数値計算からエネルギー変換効率へのサブセル内部発光効率の影響や特徴を定量抽出し、それを基に多接合太陽電池の現実的な設計指針を提案した。多接合太陽電池のサブセル動作性能評価方法として、太陽電池に順方向バイアスを印加した発光ダイオード(LED)動作時の電界効果発光の絶対光量計測と定式化した拡張詳細平衡関係式による解析を用いた手法を開発した。実際に衛星用 InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池へと適用し、その有効性を検証した。

(i) 絶対電界発光計測：各接合サブセルに非輻射再結合ロスが存在する場合に、それらがどの程度敏感にエネルギー変換効率低下をもたらすかを、拡張詳細平衡理論により定式化し、その数値計算を実行した。図 14 には、2～5 接合太陽電池において、各層の半導体材料の品質(内部発光の量子効率 y_{int}) が全体の太陽電池エネルギー変換効率に及ぼす効果を具体的に計算した結果を示す。デバイス全体の内部発光量子効率として、各サブセルの内部発光量子効率 y_{int} の幾何平均である y_{int}^* で表してある。様々な y_{int} の組み合わせに対して計算したところ、各サブセルにおいて y_{int} が 0.3 以下であれば、サブセルの y_{int} 値が幾つであれ、 y_{int}^* が変換効率の良い指標となることが分かった。

図 12 において、内部発光量子効率 y_{int}^* が 100% に近い領域では、太陽電池エネルギー変換率は、 y_{int}^* の低下とともに急激に大きく低下してしまうが、 y_{int}^* が数 10% 以下になると太陽電池効率の品質依存性は小さくなる。この y_{int}^* の大きさによる変化の違いは、キャリア損失の主要機構が、 y_{int}^* が 100% に近い領域での外部輻射損失から y_{int}^* の低い領域での非発光再結合損失へと変わることによると分かった。

また、各層での半導体材料の品質(同じく発光効率)の違いにより、変換効率が最大とな

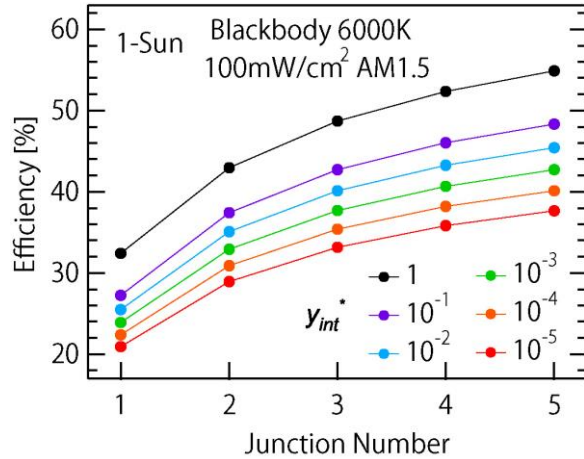


図 12. 多接合太陽電池のエネルギー変換効率と内部発光効率 y_{int}^*

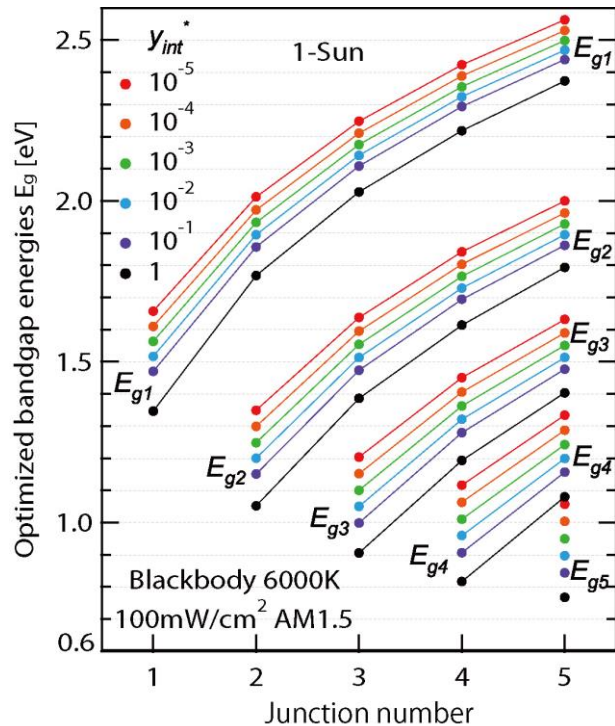


図 13. 多接合太陽電池のエネルギー変換効率と最適バンドギャップエネルギー

るデバイス最適構造が変化する。図 13 には、内部発光量子効率 y_{int}^* をパラメータとして図 12 に示した最大エネルギー変換効率を与える最適バンドギャップエネルギーの組み合わせを示してある。内部発光量子効率の小さな半導体材料を用いた場合、バンドギャップエネルギーを大きくすることにより太陽電池としてのエネルギー変換効率を大きくすることができる。すなわち、高いエネルギー変換効率を得るには、各層のバンドギャップエネルギーは増加させる必要がある。図 12 および図 13 から、例えば、2 接合(3 接合)太陽電池において、各サブセルが $y_{int}^*=10^{-3}$ 程度の品質であってもバンドギャップを最適化することで、高い変換効率 32%(37%)が実現可能であることが示唆される。

内部発光量子効率の改善とデバイス構造の最適化により、どの程度変換効率の向上が見込めるかを具体的に定量表示することにより、これを指針として非輻射再結合損失のある現実的な材料品質によるより詳細な構造設計が可能となった。

また、多接合太陽電池の各層での非輻射再結合ロスやそれによる各サブセルの動作性能を評価する実験計測・解析方法を開発した。多接合太陽電池のセル性能を測るうえで、サブセル個々の特性を如何に得るかが重要であり、特に非加工・非破壊による評価方法が必要である。そこで、光吸収過程とその逆過程である発光過程との間の相反性関係を利用し、太陽電池を LED 動作させた時の各サブセルのエレクトロルミネッセンス(EL)発光定量測定からサブセル特性を評価する解析手法を提案し、実際に実用多接合太陽電池へと適用することで開発手法の有効性を検証した。

EL 測定によるサブセル評価法はすでに報告されているが、その解析には、別途実験で得られる I-V 特性へフィッティングを行う調整を必要とし、各サブセル特性を必ずしも正しく評価できていないとは言えない。我々は、EL の絶対発光定量計測を行い、非輻射過程も含む拡張詳細平衡理論に基づく解析から、実験結果とのフィッティング調整を要しない各サブセルの動作性能や内部損失を定量評価しており、その点が特長でもある。

この定量評価手法の有効性を実験的に検証するため、JAXA との共同研究で実用高効率な衛星用 InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の特性評価へと適用した。InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池を LED 動作させ、その EL 絶対光量計測から得られた各サブセルの外部 EL 量子収率(y_{ext}^{LED})(LED 動作時の注入キャリアレートに対する試料外部への放射輻射再結合レート:右縦軸 vs 下横軸)とその詳細平衡理論解析から算出された太陽電池(SC)動作時(AM0 非集光条件下)の外部発光量子収率(y_{ext}) (SC 動作時における全再結合レートに対する試料外部への放射輻射再結合レート:左縦軸 vs 上横軸)の電流密度依存性を示す。各電流密度での外部発光量子収率が分かると、さらに非輻射再結合レート、サブセル間でのルミネッセンス結合レートが解析により算出でき、各サブセル内でのキャリア再結合及び光子放出パスの詳細を決定することができる。

また、得られた各サブセルの外部発光量子収率(y_{ext})からは詳細平衡により、図 14 に示すサブセルの I-V 特性を算出することができる。キャ

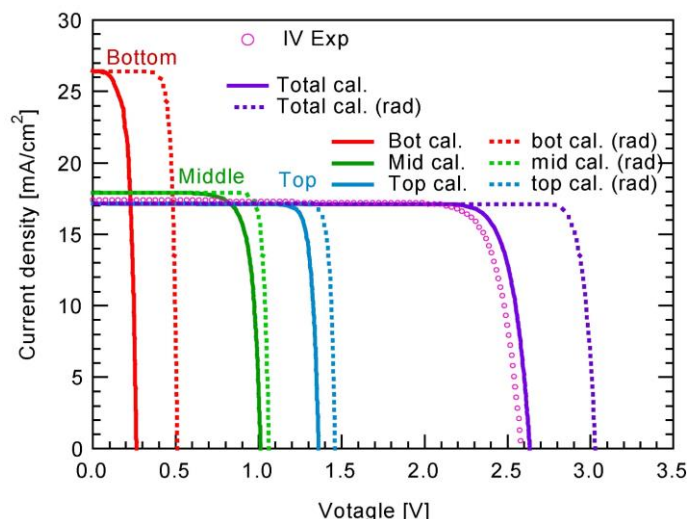


図 14. I-V 特性の計算と実験結果

リア再結合が輻射再結合のみとした場合(各(rad)点線)に対して、 y_{ext} から決まる開放電圧劣化($V_{OC} \propto \log[y_{ext}]$)を示す。解析から得られた各サブセル I-V 特性を合成することで、多接合での I-V 特性(図中 Total Cal(紫実線))が得られる。解析結果は実測結果(IV Exp(紫○))とよく一致している。また、この I-V 特性から求まるエネルギー変換効率は 28.7% となり、実験値 27.4% ともよく一致している。これらの結果は、本手法がサブセル動作特性診断に非常に有効であることを示している。

さらに、各サブセル内でのキャリア再結合及び光子放出パスの詳細が決定されるので、そこからは変換効率だけでなく、SC 動作時の各サブセルでのキャリア収支や照射された太陽エネルギーに対する太陽電池エネルギー収支の評価まで可能である。図 15 は今回の 3 接合太陽電池の AMO 1Sun 照射下、最大変換効率動作時における各サブセル内でのキャリア収支の様子を図示したものである。各サブセルでの太陽スペクトルによる光キャリア生成レート(R_{sun})を 1 とした時の、各再結合・損失レート成分の割合で示されている。ここから各サブセルにおける各再結合パスにおける損失レートを定量理解できるようになった。

サブセル素子構造の詳細(材料組成や層膜厚等)が既知となれば(または推定できれば)、得られた外部量子収率 y_{ext} から内部発光量子収率 y_{int} を推定することができ、各サブセルの半導体材料の品質評価までも行える。先に上述したように、各サブセルの半導体材料品質(または、内部発光量子効率 y_{int})が太陽電池全体のエネルギー変換効率にどのように影響するかは定式化は成されており、実験結果と定式化した理論計算結果との比較を行った。

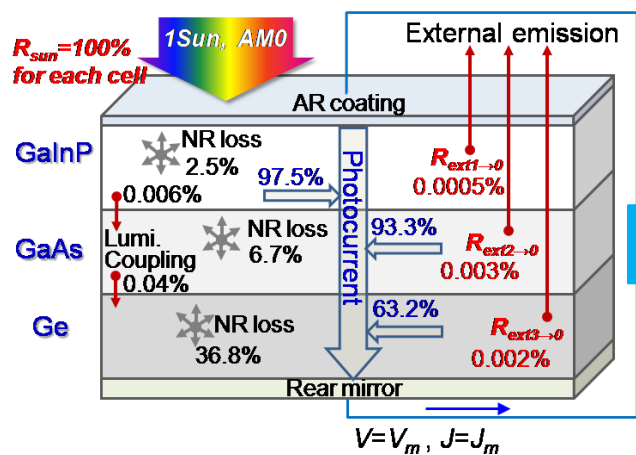


図 15. 3 接合太陽電池のサブセルにおけるキャリア収支 (最大パワー動作時)

(ii) 時間分解発光計測の動作中太陽電池のキャリア挙動解明:

光学的手法により半導体薄膜のキャリアダイナミクスの研究は数多くあるが、pn 接合を有する太陽電池デバイスの動作中のキャリア挙動に関する研究は非常に少ない。多接合からなる太陽電池デバイスのキャリア挙動はさらに複雑となる。太陽電池の効率向上やデバイス劣化抑制のためには、動作中のキャリア挙動の理解は重要となる。単接合電池では、電流電圧計測の外部量子効率 EQE からキャリア生成効率を決定できるが、多接合電池のサブセルの効率の決定は非常に困難であり、デバイスの動作点での各サブセルでのキャリア生成効率を求めることができる手法の開発が望まれている。異なるバンドギャップを有するサブセルは、異なる波長の発光を示すことから、容易に分離計測が可能となる。そこで我々は、時間分解発光計測から実用多接合太陽電池のキャリア発生効率・再結合を評価できる手法の提案と開発を行った。

光励起では、その波長を変化させることにより、励起できるサブセルを選択できる。非常

に弱い光励起では、pn 接合の内部電場によりキャリアは空間的に分離し、電子と正孔は再結合する確率は非常に小さく、発光強度は非常に小さく、発光寿命は非常に短い。弱励起極限での発光寿命 τ_1 が得られる。光励起強度を大きくしていくと、多数の電子と正孔が生成され、フラットバンド状態に近いエネルギー構造となる。その場合、発光寿命は励起強度に依存しなくなり、再結合寿命 τ_2 を得ることができる。この寿命は、単接合セルあるいは多接合のサブセルの材料特性を反映する。電圧印加実験から τ_2 に対する解釈の正しさが確認できる。

この発光寿命の励起強度依存性から、太陽電池のキャリア生成効率(収集効率)の電圧依存性を評価できる。単接合 GaAs 電池、3 接合 InGaP/GaAs/Ge 太陽電池、プロトン照射により特定のサブセルと劣化させた 3 接合電池、など多くの電池で電流電圧カーブの再現に成功した。

(iii) 非輻射再結合ロスの理論解析:

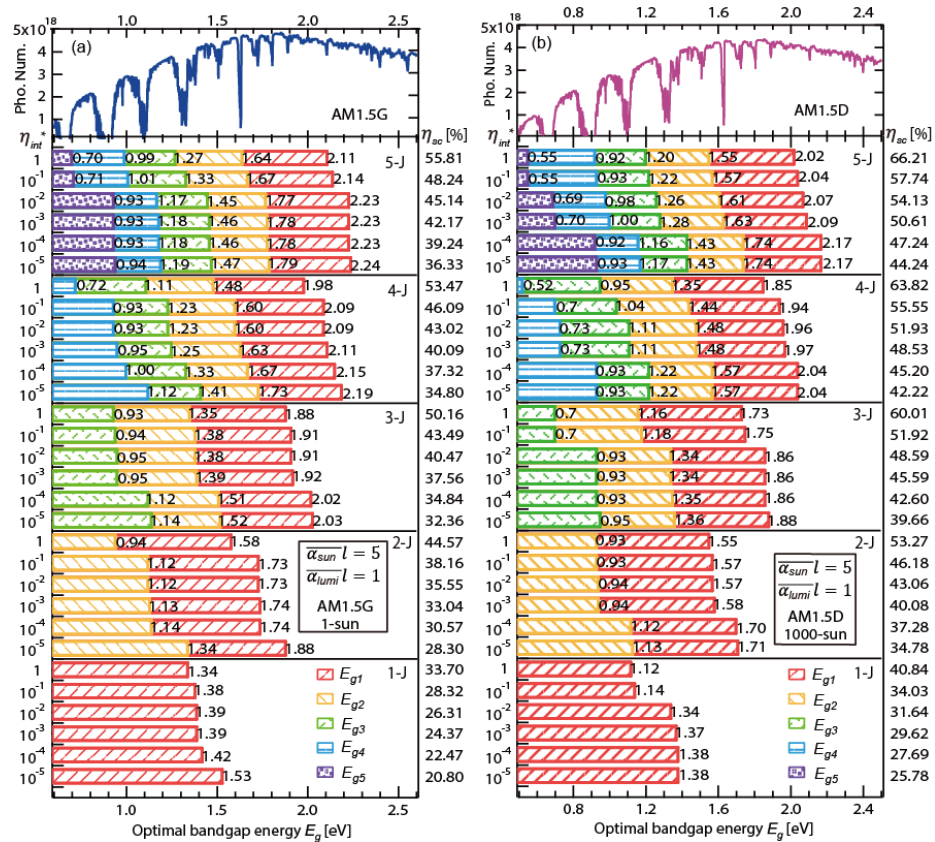


図 16. 多接合太陽電池を構成するサブセル発光効率と最適バンドギャップエネルギー。

多接合太陽電池の各サブセルに非輻射再結合ロスが存在する場合に、それらがどの程度敏感に電池全体の効率低下をもたらすかを調べるために、詳細平衡限界理論を拡張して、各サブセルの内部発光量子効率が 1 以下の有限値を持つ場合に対して定式化した。まず、最も単純な 2 接合太陽電池、太陽光を黒体放射スペクトルで近似したモデルに対して、この理論計算を適用した。太陽電池の限界変換効率は、トップセルとボトムセルの内部発光量子効率が 1 に近い領域では、両者に対して非対称かつ敏感に依存することが解った。一方、内部発光量子効率が共に 0.3 以下の領域では、限界変換効率は両者に対して対象に依存し、両者の幾何平均がよい指標になることが分かった。

さらに、3 接合以上の多接合太陽電池構造、太陽光として AM0、AM1.5G、AM1.5D 集光

条件を設定して、より現実に近い詳細な計算を行った。その結果の一例を図 16 に示す。この場合も、内部発光量子効率が全て 0.3 以下の領域では、内部発光量子効率の幾何平均がよい指標になることが解った。内部発光効率が低い領域では、裏面ミラーの有無などの構造の差異に対して、限界変換効率は強く依存しなくなる。また、内部発光量子効率の幾何平均が小さくなるにしたがって、限界電池効率は最初に著しく、その後対数的に低下し、それに応じて、最適バンドギャップ組み合わせ値は、高エネルギー側へシフトすることが解った。シフトは、AM1.5 スペクトルの大気成分による吸収線の影響で、非一様になることが分かった。これらの計算により、非輻射再結合ロスが存在する現実の材料を用いた時の多接合太陽電池の設計指針を、従来よりもさらに明確に示すことに成功し、今後の設計や解析に重要な指針が得られた。

(iv) 時間空間分解発光・光電流分光によるヘテロ太陽電池の劣化現象:

近年、ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体を用いた太陽電池の研究が活発に行われており、現在までに 22%を超える変換効率が報告されている。これまでの研究で、薄膜や単結晶におけるペロブスカイト材料固有の性質が明らかにされ、この材料の優れた点として大きな光吸収係数、自由キャリアの存在、長いキャリア拡散長が報告されている。実用化に向けて、耐久性の向上やデバイス動作中のキャリア挙動の解明が求められている。しかし、ヘテロ接合を有する実際のデバイスのキャリア挙動は複雑であり、また低温かつ溶液塗布で作製する薄膜試料では空間的な不均一性を持つことが知られている。特に、ペロブスカイトのグレインやメソポーラス TiO_2 の微細構造さらにはスピコート法の作製方法が、空間不均一性の原因と考えられる。我々は発光と光電流の空間分解イメージング測定を行うことで、ペロブスカイト太陽電池デバイスの空間的な不均一性を初めて定量的に評価することに成功した。

使用した試料は、 $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{spiro-OMeTAD}$ 太陽電池で、13%程度の太陽電池変換効率を持つものを用いた。単一光子計数法を用いて試料を移動させながら発光 (PL) の顕微時間分解測定を行うと同時に、デバイスに流れる光電流 (PC) を測定して空間イメージング像を測定した。PC 強度、PL 強度および PL 寿命は、数 $10\mu\text{m}$ オーダーで空間的に揺らいでいた(図 17)。また、光励起直後の PL 強度と PL 寿命の間に正の相関関係があることと、PC と PL 寿命の間には負の相関関係があることが分かった。これらの空間的不均一性は、光生成された電子と正孔が空間的に分離することに起因すると考えられる。さらに、この顕微イメージング分光法を利用して、実際のデバイス使用状況と同じ 1 sun 照射による光劣化前後でのキャリアの振る舞いを調べた。顕微イメージングを利用することで、同一試料で、光照射した領域と光照射していない領域の太陽電池特性を統計的に評価できた。その結果、光照射した領域ではキャリア注入効率の低下により PC の減少が起こることがわかった。

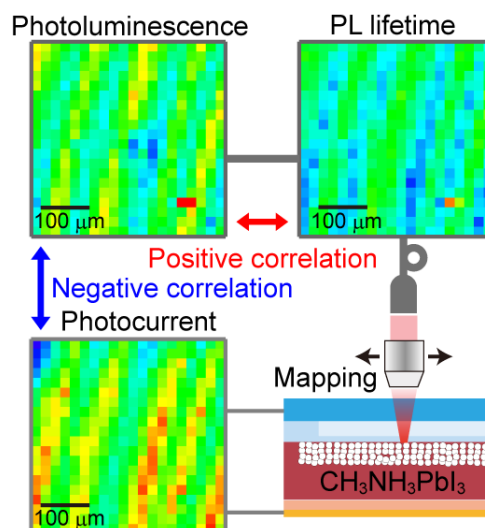


図 17. ペロブスカイト太陽電池の発光強度・発光寿命・光電流強度の空間分布

(v) EL画像計測と開放電圧の簡易計測:

これまでに開発してきた電界発光(EL)解析法を実用太陽電池の評価に応用した。冷却 InGaAs カメラとその絶対値校正により Si 結晶太陽電池の絶対 EL 画像計測を行い、開放電圧 V_{oc} を定量評価した。すなわち、撮影に感度校正されたカメラを用いれば、セルに電圧プローブを当てることなく EL 画像から直ちに V_{oc} を評価する方法を開発した。Si 結晶太陽電池の絶対 EL 画像に表れた発光パターンの濃淡は、面内抵抗による電流密度分布によるものであることが、分布形状解析により分かった。よって絶対 EL 画像の空間積分により試料からの全発光レートが得られ、注入電流量からキャリアの注入レートが算出され、発光効率 η_{extLED} が得られた。ここから本試料の室温、AM1.5G 1sun での開放電圧を算出し、 $V_{oc} = 0.8660 + 0.02585 \ln \eta_{extLED} = 0.5971 \text{ V}$ を得た。ソーラーシミュレータにより評価した値 0.5977V と良く一致した。

さらにこの Si 太陽電池セルを絶対発光量標準として用いれば、三脚に設置された任意の冷却 InGaAs カメラを容易に校正することができる。それを用いて、様々な太陽電池モジュールの絶対 EL 画像計測を行い、開放電圧 V_{oc} のマッピング評価を行った。例えば、市販・安価の太陽電池モジュール(80mm x 128 mm のセルが 6×12 のマトリクスに配置されたもの)では、割れや欠けの発見と同時に、ばらつきの大きな V_{oc} マップを得た。この方法により、モジュールとして直列に繋がれたセルの各々の V_{oc} の非破壊評価、 V_{oc} マッピング評価、屋外既設の発電システム・プラントについての経時劣化や部分劣化を含めた V_{oc} 定量評価などを行うことが可能となった。

EL効率絶対値計測法は、世界最高性能太陽電池開発などのための評価法として有効なことはもちろん、画像計測法と組み合わせることで、屋外敷設された太陽電池パネルの V_{oc} 劣化の夜間その場診断法、宇宙・地上での太陽電池劣化の原因調査法、優良製品と粗悪品との品質比較など、広い利用価値があるということが徐々に明らかになってきた。

§ 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 80 件)

1. 著者、論文タイトル、掲載誌 巻、号、発行年

〈国際〉

1. T. Nishihara, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Dynamics of exciton-hole recombination in hole-doped single-walled carbon nanotubes”, *Phys. Rev. B* 86, 075449 (2012). (DOI:10.1103/PhysRevB.86.075449).
2. Y. Yamada and Y. Kanemitsu, “Determination of electron and hole lifetimes of rutile and anatase TiO_2 single crystals”, *Appl. Phys. Lett.* 101, 133907 (2012). (DOI:10.1063/1.4754831).
3. T. Nishihara, Y. Segawa, K. Itami, and Y. Kanemitsu, “Excited states in cycloparaphenylenes: Dependence of optical properties on ring length”, *J. Phys. Chem. Lett.* 3, 3125–3128 (2012). (DOI: 10.1021/jz3014826).
4. K. Ueda, T. Tayagaki, M. Fukuda, M. Fujii, and Y. Kanemitsu, “Breakdown of the k-conservation rule in quantized Auger recombination in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ nanocrystals”, *Phys. Rev. B* 86, 155316 (2012). (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155316).
5. S. Chen, M. Okano, B. Zhang, M. Yoshita, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, “Blue 6-ps short-pulse generation in gain-switched InGaN vertical-cavity surface-emitting lasers via impulsive optical pumping”, *Appl. Phys. Lett.* 101, 191108 (2012). (DOI: 10.1063/1.4766290).
6. M. Yoshita, K. Kamide, H. Suzuura, and H. Akiyama, “Applicability of continuum absorption in semiconductor quantum wells to absolute absorption-strength standards”, *Appl. Phys. Lett.* 101, 032108 (2012). (DOI: 10.1063/1.4737900).
7. Y. Kimoto, M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Observation of excited-state excitons and band-gap renormalization in hole-doped carbon nanotubes using photoluminescence excitation spectroscopy”, *Phys. Rev. B* 87, 195416 (2013). (DOI:10.1103/PhysRevB.87.195416).
8. Y. Kanemitsu, “Multiple Exciton Generation and Recombination in Carbon Nanotubes and Nanocrystals”, *Acc. Chem. Res.* 46, 1358-1366 (2013). (DOI: 10.1021/ar300269z).
9. M. Okano, T. Nishihara, Y. Yamada, Y. Kanemitsu, “Dynamics of excitons and trions in semiconducting carbon nanotubes”, *Proc. SPIE* 8623, 86231F (2013). (DOI:10.1117/12.2003263).
10. T. Mochizuki, T. Ihara, M. Yoshita, S. Maruyama, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, “Fluorescent Radiation Thermometry at Cryogenic Temperatures Based on Detailed Balance Relation”, *Appl. Phys. Express* 6, 056602 (2013). (DOI: 10.7567/APEX.6.056602).
11. D. M. Tex, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Efficient Upconverted Photocurrent through an Auger Process in Disklike InAs Quantum Structures for Intermediate-Band Solar Cells”, *Phys. Rev. B* 87, 245305 (2013). (DOI:10.1103/PhysRevB.87.245305).
12. T. Nishihara, Y. Yamada, M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Trion Formation and Recombination Dynamics in Hole-Doped Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Appl. Phys. Lett.* 103, 023101 (2013). (DOI:10.1063/1.4813014).
13. Y. Yamada, H. K. Sato, Y. Hikita, H. Y. Hwang, and Y. Kanemitsu, “Measurement of the Femtosecond Optical Absorption of $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterostructures: Evidence for an Extremely Slow Electron Relaxation at the Interface”, *Phys. Rev. Lett.* 111, 047403 (2013). (DOI:10.1103/PhysRevLett.111.047403).
14. K. Shinokita, H. Hirori, K. Tanaka, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer and K. W. West, “Terahertz-Induced Optical Emission of Photoexcited Undoped GaAs Quantum Wells”, *Phys. Rev. Lett.* 111, 067401 (2013). (DOI : 10.1103/PhysRevLett.111.067401).
15. L. Q. Phuong, M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier localization and recombination dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals”, *Appl. Phys. Lett.* 103, 191902 (2013). (DOI:10.1063/1.4829063).
16. Y. Yamada, T. Nakamura, S. Yasui, H. Funakubo, and Y. Kanemitsu, “Measurement of transient photoabsorption and photocurrent of BiFeO_3 thin films: Evidence for long-lived trapped photocarriers”, *Phys. Rev. B* 89, 035133 (2014). (DOI:10.1103/PhysRevB.89.035133).
17. L. Zhu, C. Kim, M. Yoshita, S. Chen, S. Sato, T. Mochizuki, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, “Impact of sub-cell internal luminescence yields on energy conversion efficiencies of tandem

- solar cells: A design principle”, *Appl. Phys. Lett.* 104, 031118 (2014). (DOI:10.1063/1.4861464).
18. T. Nishihara, Y. Yamada, M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Quantized exciton-exciton recombination in undoped and hole-doped single-walled carbon nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 02BD10 (2014). (DOI:10.7567/JJAP.53.02BD10).
 19. Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Near-band-edge optical responses of solution-processed organic-inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ on mesoporous TiO_2 electrodes”, *Appl. Phys. Express* 7, 032302 (2014). (DOI:10.7567/APEX.7.032302).
 20. D. M. Tex, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Control of hot-carrier relaxation for realizing ideal quantum-dot intermediate-band solar cells”, *Sci. Rep.* 4, 4125 (2014). (DOI:10.1038/srep04125).
 21. L. Q. Phuong, M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Temperature-dependent photocarrier recombination dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals”, *Appl. Phys. Lett.* 104, 081907 (2014). (DOI:10.1063/1.4866666).
 22. D. M. Tex, T. Ihara, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Microscopic photoluminescence and photocurrent imaging spectroscopy of InAs nanostructures: Identification of photocarrier generation sites for intermediate-band solar cells”, *Phys. Rev. B* 89, 125301 (2014). (DOI:10.1103/PhysRevB.89.125301).
 23. M. Okano, T. Nishihara, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Chemical doping-induced changes in optical properties of single-walled carbon nanotubes”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 05FD02 (2014). (DOI: 10.7567/JJAP.53.05FD02).
 24. T. Nishihara, Y. Segawa, K. Itami, and Y. Kanemitsu, “Exciton recombination dynamics in nanoring cycloparaphenylenes”, *Chem. Sci.* 5, 2293-2296 (2014). (DOI: 10.1039/c3sc53462f).
 25. D. M. Tex, T. Ihara, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Temperature and light-intensity dependence of upconverted photocurrent generation in shallow InAs quantum structures”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 53, 05FV01 (2014). (DOI: 10.7567/JJAP.53.05FV01).
 26. Y. Yamada, H. K. Sato, Y. Hikita, H. Y. Hwang, and Y. Kanemitsu, “Spatial density profile of electrons near the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterointerface revealed by time-resolved photoluminescence spectroscopy”, *Appl. Phys. Lett.* 104, 151907 (2014). (DOI: 10.1063/1.4872171).
 27. M. Ono, T. Nishihara, T. Ihara, M. Kikuchi, A. Tanaka, M. Suzuki, and Y. Kanemitsu, “Impact of surface ligands on the photocurrent enhancement due to multiple exciton generation in close-packed nanocrystal thin films”, *Chem. Sci.* 5, 2696-2701 (2014). (DOI: 10.1039/c4sc00436a).
 28. M. Okano, Y. Takabayashi, T. Sakurai, K. Akimoto, H. Shibata, S. Niki, and Y. Kanemitsu, “Slow intraband relaxation and localization of photogenerated carriers in $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ thin films: Evidence for the existence of long-lived high-energy carriers”, *Phys. Rev. B* 89, 195203 (2014). (DOI: 10.1103/PhysRevB.89.195203).
 29. M. Sakamoto, K. Inoue, M. Saruyama, Y.-G. So, K. Kimoto, M. Okano, Y. Kanemitsu, and T. Teranishi, “Investigation on Photo-Induced Charge Separation in CdS/CdTe Nanopencils”, *Chem. Sci.* 5, 3831-3835 (2014). (DOI: 10.1039/C4SC00635F).
 30. T. Ihara, R. Sato, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, “Delocalized and localized charged excitons in single CdSe/CdS dot-in-rods revealed by polarized photoluminescence blinking”, *Phys. Rev. B* 90, 035309 (2014). (DOI: 10.1103/PhysRevB.90.035309).
 31. Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier Recombination Dynamics in Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ for Solar Cell Applications”, *J. Am. Chem. Soc.* 136, 11610-11613 (2014). (DOI: 10.1021/ja506624n).
 32. M. Okano, M. Sakamoto, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, “Assessment of Hot-Carrier Effects on Charge Separation in Type-II CdS/CdTe Heterostructured Nanorods”, *J. Phys. Chem. Lett.* 5, 2951-2956 (2014). (DOI: 10.1021/jz501564q).
 33. T. Ihara and Y. Kanemitsu, “Spectral diffusion of neutral and charged exciton transitions in single CdSe/ZnS nanocrystals due to quantum-confined Stark effect”, *Phys. Rev. B* 90, 195302 (2014). (DOI: 10.1103/PhysRevB.90.195302).
 34. L. Zhu, T. Mochizuki, M. Yoshita, S. Chen, S. Sato, C. Kim, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, “Conversion Efficiency Limits and Optimized Designs for Tandem Solar Cells with Realistic Sub-cell Material Quality”, *Photovoltaics Specialists Conference 2014, 40th IEEE*, 3404-3408

- (2014). (DOI: 10.1109/PVSC.2014.6925662).
35. D. M. Tex, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, "Identification of trap states for two-step two-photon-absorption processes in InAs quantum structures for intermediate-band solar cells", Photovoltaics Specialists Conference 2014, 40th IEEE, 3618-3621 (2014). (DOI:10.1109/PVSC.2014.6924889).
 36. S. Chen, L. Zhu, M. Yoshita, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, "Balance sheets of energy and carriers and subcell characteristics in a GaInP/GaAs/Ge tandem solar cell", Photovoltaics Specialists Conference 2014, 40th IEEE, 1780-1783 (2014). (DOI:10.1109/PVSC.2014.6925268).
 37. L. Q. Phuong, M. Okano, Y. Yamada, G. Yamashita, T. Morimoto, M. Nagai, M. Ashida, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, "Ultrafast free-carrier dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals studied using femtosecond time-resolved optical spectroscopy", Appl. Phys. Lett. 105, 231902 (2014). (DOI: 10.1063/1.4903802).
 38. G. Yamashita, E. Matsubara, M. Nagai, Y. Kanemitsu, and M. Ashida, "Intrinsic carrier multiplication efficiency in bulk Si crystals evaluated by optical-pump/terahertz-probe spectroscopy", Appl. Phys. Lett. 105, 231118 (2014). (DOI: 10.1063/1.4903859).
 39. H. Tahara and Y. Kanemitsu, "Dynamical coherent control of photocurrent in bulk GaAs at room temperature", Phys. Rev. B 90, 245203 (2014). (DOI: 10.1103/PhysRevB.90.245203).
 40. Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, "Photoelectronic responses in solution-processed perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells studied by photoluminescence and photoabsorption spectroscopy", IEEE J. Photovolt. 5, 401-405 (2015). (DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2364115).
 41. D. M. Tex, T. Ihara, H. Akiyama, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, "Time-resolved photoluminescence measurements for determining voltage-dependent charge-separation efficiencies of subcells in triple-junction solar cells", Appl. Phys. Lett. 106, 013905 (2015). (DOI: 10.1063/1.4905474).
 42. S. Chen, L. Zhu, M. Yoshita, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, "Thorough subcells diagnosis in a multi-junction solar cell via absolute electroluminescence-efficiency measurements", Sci. Rep. 5, 7836 (2015). (DOI: 10.1038/srep07836).
 43. Y. Yamada, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, "Spontaneous Defect Annihilation in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Thin Films at Room Temperature Revealed by Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy", J. Phys. Chem. Lett. 6, 482-486 (2015). (DOI: 10.1021/jz5026596).
 44. M. Sakamoto, L. Chen, M. Okano, D. M. Tex, Y. Kanemitsu, and T. Teranishi, "Photoinduced Carrier Dynamics of Nearly Stoichiometric Oleylamine-Protected Copper Indium Sulfide Nanoparticles and Nanodisks", J. Phys. Chem. C 119, 11100-11105 (2015). (DOI: 10.1021/jp511864p).
 45. H. Akiyama, L. Zhu, M. Yoshita, C. Kim, S. Chen, T. Mochizuki, and Y. Kanemitsu, "Multi-junction-solar-cell designs and characterizations based on detailed-balance principle and luminescence yields", Proc. SPIE 9358, 93580B (2015). (DOI:10.1117/12.2175825).
 46. T. Nishihara, H. Tahara, M. Okano, M. Ono, and Y. Kanemitsu, "Fast Dissociation and Reduced Auger Recombination of Multiple Excitons in Closely Packed PbS Nanocrystal Thin Films", J. Phys. Chem. Lett. 6, 1327-1332 (2015). (DOI: 10.1021/acs.jpclett.5b00293).
 47. M. Okano, L. Q. Phuong, and Y. Kanemitsu, "Photocarrier dynamics in CIGS, CZTS, and related materials revealed by ultrafast optical spectroscopy", Phys. Status Solidi B 252, No.6, 1219-1224 (2015). (DOI: 10.1002/pssb.201400260).
 48. M. Okano, H. Hagiya, T. Sakurai, K. Akimoto, H. Shibata, S. Niki, and Y. Kanemitsu, "Individual identification of free hole and electron dynamics in $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ thin films by simultaneous monitoring of two optical transitions", Appl. Phys. Lett. 106, 181903 (4 pages) (2015). (DOI: 10.1063/1.4919902).
 49. L. Q. Phuong, M. Okano, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, "Photocarrier dynamics in undoped and Na-doped $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals revealed by ultrafast time-resolved terahertz spectroscopy", Appl. Phys. Express 8, 062303 (4 pages) (2015). (DOI:10.7567/APEX.8.062303).
 50. Y. Yamada, D. M. Tex, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, "Femtosecond upconverted photocurrent spectroscopy of InAs quantum nanostructures", Appl. Phys. Lett. 107, 013905 (5 pages) (2015). (DOI: 10.1063/1.4926569).

51. Y. Yamada, T. Yamada, L. Q. Phuong, N. Maruyama, H. Nishimura, A. Wakamiya, Y. Murata, and Y. Kanemitsu, "Dynamic Optical Properties of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Single Crystals as Revealed by One- and Two-photon Excited Photoluminescence Measurements", *J. Am. Chem. Soc.* 137, 10456-10459 (2015). (DOI: 10.1021/jacs.5b04503).
52. L. Q. Phuong, M. Okano, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, "Free-carrier dynamics and band tails in $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: Evaluation of factors determining solar cell efficiency", *Phys. Rev. B* 92, 115204 (7pages) (2015). (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.115204).
53. M. Okano, M. Endo, A. Wakamiya, M. Yoshita, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, "Degradation mechanism of perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ diode devices studied by electroluminescence and photoluminescence imaging spectroscopy", *Appl. Phys. Express* 8, 102302 (4pages) (2015). (DOI: 10.7567/APEX.8.102302).
54. T. Ihara and Y. Kanemitsu, "Absorption cross-section spectrum of single CdSe/ZnS nanocrystals revealed through photoluminescence excitation spectroscopy", *Phys. Rev. B* 92, 155311 (5pages) (2015). (DOI: 10.1103/PhysRevB.92.155311).
55. D. M. Tex, M. Imaizumi and Y. Kanemitsu, "Charge separation in subcells of triple-junction solar cells revealed by time-resolved photoluminescence spectroscopy", *Opt. Express* 23, A1687 (6pages) (2015). (DOI: 10.1364/OE.23.0A1687).
56. K. Uchida, H. Hirori, T. Aoki, C. Wolpert, K. Tanaka, T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, "Time-resolved observation of excitonic dynamics under coherent terahertz excitation in GaAs quantum wells", *Proc. SPIE*, Vol. 9361, 93611L-1-L-6 (2015). (DOI:10.1117/12.2078419).
57. K. Uchida, H. Hirori, T. Aoki, C. Wolpert, T. Tamaya, K. Tanaka, T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, "Time-resolved observation of coherent excitonic nonlinear response with a table-top narrowband THz pulse wave", *Appl. Phys. Lett.* 107, 221106 (5 pages) (2015). (DOI: 10.1063/1.4936753).
58. T. Nishihara, Y. Yamada, M. Okano and Y. Kanemitsu, "Dynamics of the Lowest-Energy Excitons in Single-Walled Carbon Nanotubes under Resonant and Nonresonant Optical Excitation", *J. Phys. Chem. C* 119, 28654-28659 (2015). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b09485).
59. T. Yamada, Y. Yamada, H. Nishimura, Y. Nakaike, A. Wakamiya, Y. Murata and Y. Kanemitsu, "Fast Free-Carrier Diffusion in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Single Crystals Revealed by Time-Resolved One- and Two-Photon Excitation Photoluminescence Spectroscopy", *Adv. Electron. Mater.* 2, 1500290 (5pages) (2016). (DOI: 10.1002/aelm.201500290).
60. T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, J. Mitchell, Z. Lin, S. Chen, H. Takato, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Solar-cell radiance standard for absolute electroluminescence measurements and open-circuit voltage mapping of silicon solar modules", *J. Appl. Phys.* 119, 034501 (8pages) (2016). (DOI: 10.1063/1.4940159).
61. H. Tahara and Y. Kanemitsu, "Observation of localized states in bulk GaAs using ultrafast photocurrent beat spectroscopy", *Appl. Phys. Express* 9, 032403 (4pages) (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.032403).
62. M. Yoshita, L. Zhu, C. Kim, T. Mochizuki, T. Nakamura, M. Imaizumi, S. Chen, H. Kubota, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Calibration standards and measurement accuracy of absolute electroluminescence and internal properties in multi-junction and arrayed solar cells", *Proc. SPIE*, 9743, 97430D1-6 (2016). (DOI: 10.1117/12.2211726).
63. L. Zhu, M. Yoshita, T. Nakamura, M. Imaizumi, C. Kim, T. Mochizuki, S. Chen, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Characterization and modeling of radiation damages via internal radiative efficiency in multi-junction solar cells", *Proc. SPIE*, 9743, 97430U1-7 (2016). (DOI: 10.1117/12.2212827).
64. L. Zhu, T. Mochizuki, M. Yoshita, S. Chen, C. Kim, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, "Conversion efficiency limits and bandgap designs for multi-junction solar cells with internal radiative efficiencies below unity", *Opt. Express* 24, A740-A751 (2016). (DOI: 10.1364/OE.24.00A740).
65. L. Zhu, M. Yoshita, S. Chen, T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Characterizations of radiation damages in multi-junction solar cells focused on subcell internal luminescence quantum yields via absolute electroluminescence measurements", *IEEE J. Photovolt.* 6, 777-782 (2016). (DOI: 10.1109/JPHOTOV.2016.2540247)
66. H. Tahara, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, "Experimental Evidence of Localized

- Shallow States in Orthorhombic Phase of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Thin Films Revealed by Photocurrent Beat Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. C* 120, 5347-5352 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b01283).
67. H. Ibuki, T. Ihara, and Y. Kanemitsu, “Photoluminescence blinking and spectral diffusion of single CdSe/ZnS nanocrystals: charge fluctuation effects”, *Proc. SPIE* Vol. 9758 97580R1-8 (2016). (DOI: 10.1117/12.2210817).
 68. T. Handa, M. Okano, D. M. Tex, A. Shimazaki, T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Carrier injection and recombination processes in perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells studied by electroluminescence spectroscopy”, *Proc. SPIE* Vol. 9745 97450I1-7 (2016). (DOI: 10.1117/12.2212052).
 69. T. Handa, D. M. Tex, A. Shimazaki, T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Optical characterization of voltage-accelerated degradation in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cells”, *Opt. Express* 24, A917-A924 (2016). (DOI: 10.1364/OE.24.00A917).
 70. Y. Yamada, T. Yamada, A. Shimazaki, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Interfacial Charge-Carrier Trapping in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -Based Heterolayered Structures Revealed by Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy”, *J. Phys. Chem. Lett.* 7, 1972-1977 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcllett.6b00653).
 71. L. Q. Phuong, Y. Yamada, M. Nagai, N. Maruyama, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Free Carriers versus Excitons in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Thin Films at Low Temperatures: Charge Transfer from the Orthorhombic Phase to the Tetragonal Phase”, *J. Phys. Chem. Lett.* 7, 2316-2321 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcllett.6b00781).
 72. D. Yamashita, T. Handa, T. Ihara, H. Tahara, A. Shimazaki, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Charge Injection at the Heterointerface in Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Solar Cells Studied by Simultaneous Microscopic Photoluminescence and Photocurrent Imaging Spectroscopy” *J. Phys. Chem. Lett.* 7, 3186-3191 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcllett.6b01231).
 73. H. Ibuki, T. Ihara, and Y. Kanemitsu, “Spectral Diffusion of Emissions of Excitons and Trions in Single CdSe/ZnS Nanocrystals: Charge Fluctuations in and around Nanocrystals”, *J. Phys. Chem. C* 120, 23772-23779 (2016). (DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b06220)
 74. D. M. Tex, K. Akahane, and Y. Kanemitsu, “Intrinsic Trade-off between Up-Conversion and Trapping Rates in InAs Quantum Dots for Intermediate-Band Solar Cells”, *Phys. Rev. Applied* 6, 044003 (2016). (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.044003)
 75. D. M. Tex, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, “Internal luminescence efficiencies in InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells evaluated from photoluminescence through optical coupling between subcells”, *Sci. Rep.* 6, 38297 (8 pages) (2016). (DOI: 10.1038/srep38297)
 76. T. Yamada, Y. Yamada, Y. Nakaike, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Photon Emission and Reabsorption Processes in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Single Crystals Revealed by Time-Resolved Two-Photon-Excitation Photoluminescence Microscopy”, *Phys. Rev. Applied* 7, 014001 (8 pages) (2017). (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.014001)
 77. D. M. Tex, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Analyzing the Electrical Performance of a Solar Cell with Time-Resolved Photoluminescence: Methodology for Fast Optical Screening”, *Phys. Rev. Applied* 7, 014019 (8 pages) (2017). (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.014019)
 78. G. Yamashita, E. Matsubara, M. Nagai, C. Kim, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, and M. Ashida, “Sensitive monitoring of photocarrier densities in the active layer of a photovoltaic device with time-resolved terahertz reflection spectroscopy”, *Appl. Phys. Lett.* 110, 071108 (5 pages) (2017). (DOI: 10.1063/1.4975631)
 79. L. Zhu, M. Yoshita, J. Tsai, Y. C. Wang, C.Y. Hong, G. C. Chi, C. Kim, P. Yu, H. Akiyama, “Diagnosis of GaInAs/GaAsP multiple quantum well solar cells with Bragg reflectors via absolute electroluminescence”, *IEEE Journal of Photovolt.* 7, 781-786 (2017). (DOI:10.1109/JPHOTOV.2017.2662083)
 80. D. M. Tex, T. Nakamura, M. Imaizumi, T. Ohshima, and Y. Kanemitsu, “Direct evaluation of influence of electron damage on the subcell performance in triple-junction solar cells using photoluminescence decays”, *Sci. Rep.* 7, 1985 (8 pages) (2017). (DOI: 10.1038/s41598-017-02141-0)

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

1. 金光義彦, “半導体ナノ粒子のマルチエキシトン”, 日本化学会編カレントレビューシリーズ第9巻, 化学同人 (2012) Chap.16.
2. I. Kamiya, D. M. Tex, K. Shimomura, F. Yamada, K. Takabayashi, and Y. Kanemitsu, “InAs quantum well islands — A novel structure for photon up-conversion from the near IR to the visible”, 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 3040 - 3044 (2013). (DOI: 10.1109/PVSC.2013.6745102).
3. 山田泰裕, 金光義彦, “SrTiO₃ のバンド間発光と光キャリアダイナミクス”, 固体物理 Vol.49, 25-33 (2014).
4. 山田泰裕, 若宮淳志, 金光義彦, “ペロブスカイト半導体太陽電池”, 固体物理 Vol.49, No.9 545-553 (2014).
5. 金光義彦, “ナノ構造半導体におけるキャリア多体効果: 太陽光を効率良く電力変換”, 応用物理, Vol.83, No.12, 986-992 (2014).
6. 若宮淳志, 山田泰裕, 金光義彦, “第2編 第5章 有機金属ハライドペロブスカイト材料のX線結晶構造解析”, 「ペロブスカイト薄膜太陽電池の開発と最新技術」, 技術教育出版, p.78-91 (2014).
7. Y. Yamada and Y. Kanemitsu, “Photocarrier Recombination Dynamics of Perovskite Semiconductor SrTiO₃” 「Excitonic and Photonic Processes in Materials」 edited by J. Singh and R. T. Williams, Springer (2015). Chap.1.
8. 金光義彦, “4.2.2 不純物中心や微粒子の発光現象: 半導体ナノ粒子の発光明滅現象”, 「発光の事典 —基礎からイメージングまで—」木下修一, 太田信廣, 永井健治, 南不二雄, 編集, 朝倉書店, p. 281-288 (2015).
9. 秋山英文, “多接合太陽電池の診断・設計と発光絶対値・発光量子効率の評価”, 応用物理 Vol.84, No.4, 319-325 (2015).
10. 金光義彦, “コロイドナノ粒子薄膜の太陽電池”, エネルギーデバイス Vol.2, No.5, 64-69 (2015).
11. 金光義彦, 山田泰裕, “ハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池”, 日本物理学会誌 Vol.70, No.12, 926-931 (2015).
12. L. Zhu, M. Yoshita, S. Chen, T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, “Characterizations of radiation damages in multi-junction solar cells focused on subcell internal luminescence quantum yields via absolute electroluminescence measurements”, 42nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference (2015) (DOI:10.1109/PVSC.2015.7355671).
13. L. Q. Phuong, M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Photoelectrical properties of undoped and Na-doped Cu₂ZnSnS₄ single crystals measured by optical time-resolved spectroscopy, Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)”, 2015 IEEE 42nd, (DOI:10.1109/PVSC.2015.7356088).
14. D. M. Tex, T. Ihara, H. Akiyama, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Determining subcell carrier-collection efficiencies of triple-junction solar cells using time-resolved photoluminescence”, Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd, (DOI: 10.1109/PVSC.2015.7356197).
15. M. Yoshita, L. Zhu, C. Kim, H. Akiyama, S. Chen, T. Mochizuki, H. Kubota, T. Nakamura, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Absolute electroluminescence imaging of multi-junction solar cells and calibration standards”, Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd, (DOI: 10.1109/PVSC.2015.7356199).
16. 金光義彦 “ハロゲン化鉛ペロブスカイトの光機能: 物質から太陽電池デバイスへ”, 化学工業, vol.67, No.1, 26-33 (2016).
17. 金光義彦 “第3章 第1節 量子ナノ構造のキャリア多体効果を利用した高効率太陽電池への挑戦”, 「近赤外・紫外線-波長変換と光吸収増大による太陽電池の高効率化技術」, S&K出版, 169-180 (2016).
18. L. Q. Phuong, J. K. Katahara, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, H. W. Hillhouse, and Y.

- Kanemitsu, "Impact of alkali doping on carrier transport in $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ thin films for solar cell applications" 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 0027-0030 (2016). (DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749402)
19. D. M. Tex, T. Nakamura, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, "Universal behavior of time-resolved photoluminescence decays in III-V solar cells: Comparison of subcell current generation dynamics" 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 1235-1238 (2016). (DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749811)
 20. L. Zhu, M. Yoshita, T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Current leakage and fill factor in multi-junction solar cells linked via absolute electroluminescence characterization" 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 1239-1243 (2016). (DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749812)
 21. M. Yoshita, L. Zhu, H. Kubota, T. Nakamura, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, "Accuracy evaluations for standardization of multi-junction solar-cell characterizations via absolute electroluminescence" 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 3570-3573 (2016). (DOI: 10.1109/PVSC.2016.7750337)
 22. 金光義彦, "ナノ粒子フォトニクス" クリーンテクノロジー vo.26, No.10, 45-49 (2016).

(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 34 件、国際会議 28 件)

1.発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

〈国内〉

1. 金光義彦(京大化研), "量子ドット太陽電池におけるマルチエキシトン生成", 日本学術振興会光電相互変換第 125 委員会・175 委員会合同研究会, 浜松市, 2012/5/18.
2. 金光義彦(京大化研), "半導体におけるキャリア増幅と太陽電池への利用", 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山市, 2012/9/11.
3. 秋山英文(東大物性研), "量子細線・井戸における非平衡電子正孔系", 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山市, 2012/9.
4. 金光義彦(京大化研), "ヘテロ構造太陽電池材料のキャリア多体効果とエネルギー変換の高効率化", 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会, 長野県, 2012/12/21.
5. 秋山英文(東大物性研), "太陽電池の詳細平衡条件と非平衡性・相互作用効果", 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会, 長野県, 2012/12/21.
6. 金光義彦(京大化研), "キャリア多体効果と高効率フォトニクスデバイス", 丸文財団シンポジウム, 東京, 2013/5/9.
7. 金光義彦(京大化研), "太陽電池材料のスペクトロスコーピー", 東京大学物性研究所短期研究会「エネルギーと新材料の物性・物質科学」, 柏, 2013/11/11.
8. 金光義彦(京大化研), "ナノ構造半導体のキャリア多体効果とフォトニクス", 豊田工業大学局所構造制御研究センターシンポジウム, 名古屋, 2013/11/15.
9. 金光義彦(京大化研), "ナノ物質光科学の最近の進展, 蛍光体同学会", 第 350 回記念講演会, 東京, 2013/11/29.
10. 金光義彦(京大化研), "ナノ構造半導体のマルチエキシトンとフォトニクス", 大阪大学基礎工第 3 回固体物理学セミナー, 大阪大学, 2014/6/27.
11. 金光義彦(京大化研), "ナノ物質と光科学", 第 7 回次世代先端光科学研究会, 京都大学, 2014/7/28.
12. 金光義彦(京大化研), "ナノ物質の光機能と高効率太陽電池の設計", CMSI (Computational Materials Science Initiative) 第一部会「新物質・新量子相の基礎科学」夏の学校 2014, 滋賀, 2014/8/18.
13. 金光義彦(京大化研), "量子ドット薄膜の光機能と太陽電池への応用", 電子情報技術産業協会量子ドット利用デバイス技術分科会, 電子情報技術産業協会, 2014/11/18.
14. 金光義彦(京大化研), "コロイド量子ドット薄膜におけるマルチエキシトン生成と太陽電池", セミナー「コロイド量子ドットの調整・特性と応用技術」, 情報技術機構, 2014/12/4.

15. 金光義彦(京大化研), “ナノ構造半導体を利用した高効率太陽電池の開発”, 大阪大学ナノ理工学人材育成産学コンソーシアム, 平成 26 年度第 3 回ナノ理工学情報交流会, 2015/1/14.
16. 金光義彦(京大化研), “量子ドット太陽電池の魅力と課題”, 日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会第 93 回研究会, 上智大学, 2015/3/6.
17. 秋山英文(東大物性研), “太陽電池の詳細平衡理論と応用”(チュートリアル講演), 日本物理学会, 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/3/22.
18. 金光義彦(京大化研), “発光材料と発光計測: 単一光子光源から太陽電池まで”, 日本学術振興会光電相互変換第 125 委員会, 明治大学, 2015/5/12.
19. 金光義彦(京大化研), “太陽電池評価システム”, 京都大学新技術説明会, JST 東京本部別館, 2015/5/19.
20. 金光義彦(京大化研), “太陽電池におけるキャリア生成, 分離, 輸送,” 2015 年度前期 物性研究所 短期研究会 機能物性融合科学研究会シリーズ(3)「反応と輸送」, 東京大学物性研究所, 2015/6/25.
21. 金光義彦(京大化研), “ナノ構造半導体におけるキャリア多体効果: 太陽光を効率よく電力変換 [解説論文賞受賞記念講演]”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/14.
22. 金光義彦(京大化研), “Near-band-edge optical responses of solution-processed organic-inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ on mesoporous TiO_2 electrodes [優秀論文賞受賞記念講演]”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
23. 金光義彦(京大化研), “光エネルギー変換と半導体光物理学の将来”, 日本物理学 2015 年秋季大会関西大学, 2015/9/17.
24. 金光義彦(京大化研), “高効率太陽電池のデザイン: 変換効率を決める原理は何か” 高分子同友会, 高分子学会, 2015/9/24.
25. 金光義彦(京大化研), “ナノ粒子フォトンクス: 単一光子源, QD-LED, 太陽電池への挑戦”, ディスプレイデバイスフォーラム, 幕張メッセ・国際会議場, 2015/10/9.
26. 金光義彦(京大化研), “太陽電池の魅力と課題”, 京都大学化学研究所公開講演会, 京都大学化学研究所, 2015/10/25.
27. 金光義彦(京大化研), “レーザー分光と薄膜太陽電池: 高変換効率への挑戦”, 日本分光学会関西支部 H27 年度総会・講演会, 京都大学, 2016/3/9.
28. 秋山英文(東大物性研), “太陽電池の絶対エレクトロルミネッセンス画像計測法と応用”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大大岡山キャンパス, 2016/3/19.
29. 金光義彦(京大化研), “ナノ粒子量子ドットの発光と QD-LED”, 日本学術振興会光電相互変換 125 委員会講演会, 明治大学, 2016/6/13.
30. 金光義彦(京大化研), “ハロゲン化鉛ペロブスカイトの光物理”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟朱鷺メッセ, 2016/9/13.
31. 金光義彦(京大化研), “太陽電池とテラヘルツ分光”, テラヘルツ科学の最前線 III, 三国観光ホテル, 2016/11/24.
32. 金光義彦(京大化研), “太陽電池の光物性: 魅力と課題”, 第 27 回光物性研究会, 神戸大学, 2016/12/3.
33. 金光義彦(京大化研), “太陽電池とテラヘルツ分光” テラヘルツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会・第 30 回委員会, 2017/2/3.
34. 秋山英文(東大物性研), “Extended detailed-balance analysis and light management in high-efficiency solar cells”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜, 2017/3/16.

〈国際〉

1. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Multiexciton Dynamics in New Solar Cell Materials”, 7th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium-Nanoscience and Nanotechnology in the Next Ten Years, Osaka, Japan, 2011/11/11.
2. H. Akiyama (Univ. Tokyo), “Characteristics and applications of nonlinear gain in low-dimensional semiconductor lasers”, DYCE-ASIA Workshop, Tokyo, Japan, 2012/4/24.
3. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Multicarrier recombination dynamics in semiconductors”, DYCE-ASIA Workshop, Tokyo, Japan, 2012/4/24.
4. T. Nishihara (Kyoto Univ.), M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Dynamics of Excitons and Trions in Single-Walled Carbon Nanotubes”, 221st ECS Meeting in Seattle, Washington, USA, 2012/5/8.
5. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), M. Okano, T. Nishihara, S. Taguchi and Y. Yamada, “Multicarrier Recombination Dynamics in Semiconductor Nanomaterials”, Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12), Nara, Japan, 2012/6/6.
6. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Optical Responses of Group IV Semiconductor Nanostructures”, International Union of Materials Research Societies- Int'l Conf. on Electronic Materials (IUMRS-ICEM2012), Yokohama, Japan, 2012/9/24.
7. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Multiexciton Generation and Recombination in Semiconductor Nanomaterials”, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2012), Kyoto, Japan, 2012/9/25.
8. D. Tex (Kyoto Univ.), I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Efficient upconversion in InAs/AlGaAs quantum well islands for intermediate state solar cells”, 4th International Workshop on Quantum Nanostructure Solar Cells, Kobe, Japan, 2012/12/5.
9. M. Okano (Kyoto Univ.), T. Nishihara, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Dynamics of excitons and trions in semiconducting carbon nanotube”, SPIE Photonics West 2013, California, USA, 2013/2/6.
10. T. Nishihara (Kyoto Univ.), Y. Yamada, M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Quantized Exciton Recombination Dynamics in Single-Walled Carbon Nanotubes”, The 7th International Conference on Nanophotonics/The 3rd Conference on Advances in Optoelectronics and Micro/Nano Optics (ICNP/AOM 2013), Hong Kong, China, 2013/5/23.
11. M. Okano and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Spectroscopy of higher exciton states in single-walled carbon nanotubes”, International Conference on Small Science (ICSS 2013), Las Vegas, USA, 2013/12/15.
12. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Silicon Quantum Dot Optoelectronics: Status and Future Challenges”, 2014 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, USA, 2014/6/8.
13. M. Okano and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Photocarrier dynamics in CIGS, CZTS and related materials revealed by ultrafast optical spectroscopy”, 19th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-19), Niigata, Japan, 2014/9/3.
14. H. Akiyama (Univ. Tokyo), L. Zhu, M. Yoshita, C. Kim, S. Chen, and Y. Kanemitsu, “Multi-junction-solar-cell designs and characterizations based on detailed-balance principle and luminescence yields (Invited Paper)”, SPIE Photonic West 2015, Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices IV (Conference 9358), San Francisco, USA, 2015/2/10.
15. H. Akiyama (Univ. Tokyo), “Subcells Diagnosis and Energy Balance Sheets in Tandem Solar Cells via Absolute Electroluminescence-efficiency Measurements”, Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/7th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials, Nagoya, Japan, 2015/3/29.
16. D. M. Tex and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Perspective of Realizing nanostructure Intermediate-Band Solar cells”, Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials/7th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Application for Nitrides and Nanomaterials, Nagoya, Japan, 2015/3/29.
17. T. Ihara and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Photoluminescence blinking and spectral diffusion in single semiconductor nanocrystals”, EMN Meeting on Quantum Technology, Beijing, China, 2015/4/15.
18. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Time-Resolved Optical Spectroscopy of Semiconductor

Materials and Devices: Nanocrystals, Nanotubes, and Perovskites”, The Korean Physical Society Daejeon, Korea, 2015/4/23.

19. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), Luminescence spectroscopy of semiconductor nanomaterials: From nano-scale photon emitters to large-scale solar cells, 15th International Symposium on Science and Technology of Lighting, Kyoto, 2016/5/23.
20. Y. Yamada (Chiba Univ.) and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), Dynamical behaviors of photocarriers in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin films and single crystals, Telluride Workshop “Electronic and Structural Dynamics in Hybrid Perovskites: Theory Meets Experiment, USA, 2016/7/12.
21. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), Luminescence Spectroscopy of Metal-Halide Perovskites: A Solution-Processed High-Efficiency Photonic Material, PRiME 2016 230th ECS Meeting, Hawaii USA, 2016/10/5.
22. H. Akiyama (Univ. Tokyo), "Absolute electroluminescence measurements and radiative-efficiency analysis on high-efficiency solar cells", PVSEC26, October 24-28, 2016, Singapore. (Invited)
23. H. Akiyama (Univ. Tokyo), "Absolute Electroluminescence Methodology for Standardization and Application to Solar Cell Characterization", 19th AM0 workshop on Space Solar Cell Calibration and Measurement Techniques, November 15-18, 2016, ANA Kanazawa Crowne Plaza Hotel, Kanazawa, Japan. (Plenary Presentation)
24. H. Akiyama (Univ. Tokyo), "Smart nano light emitters", 2nd NTU-UT Joint Conference searching solutions to grand challenges in East Asia, Nov. 30 - Dec. 1, 2016, National Taiwan University, Taiwan.
25. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), Light emission from solution-processed high-quality semiconductor nanomaterials: nanoparticles and perovskites, IDW16, Fukuoka, 2016/12/7-9.
26. I. Kamiya, D. M. Tex, Y. Zhang, and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Photon upconversion using InAs-based quantum structures and the control of intermediate states” SPIE Photonic West 2017, San Francisco, USA, 2017/1/30.
27. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), Photophysics of organometal halide perovskites: A high-quality solution-processed optoelectronic material, ISPlasma2017/IC-PLANTS2017, Nagoya, 2017/3/5.
28. Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), THz spectroscopy as a new characterization tool for solar-cell materials and devices, Molecular Photoscience Research Center International Symposium "Recent Advances in Terahertz Molecular Science”, Kobe, 2017/3/10.

② 口頭発表 (国内会議 90 件, 国際会議 47 件)

1. 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

〈国内〉

1. 西原大志(京大化研), 山田泰裕, 金光義彦, “正孔ドーピングされた単層カーボンナノチューブにおける励起子緩和ダイナミクス”, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京都, 2012/3/16.
2. 上田慧(京大化研), 太野垣健, 福田真俊, 藤井稔, 金光義彦, “ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ナノ粒子におけるマルチキャリアのダイナミクス”, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京都, 2012/3/17.
3. 西原大志(京大化研), 金光義彦, “ホールドーピングした単層カーボンナノチューブの励起子緩和ダイナミクス”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 西宮市, 2012/3/25.
4. 上田慧(京大化研), 太野垣健, 福田真俊, 藤井稔, 金光義彦, “ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ナノ粒子の量子化オージェ再結合”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 西宮市, 2012/3/27.
5. 田口誠二(京大化研), 猿山雅亮, 寺西利治, 金光義彦, “CdS/CdTe ヘテロダイマーナノ粒子の高密度キャリアダイナミクス”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 西宮市, 2012/3/27.
6. D. Tex(京大化研), I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Upconverted photocurrent for efficient intermediate state solar cells through Auger process in InAs quantum structures”, 2012 年秋季第 73 回応用物理学学会学術講演会, 松山市, 2012/9/11.
7. 井原章之(京大化研), 高橋 和, 野田 進, 金光義彦, “シリコンフォトニック結晶における高

- 密度励起状態の発光ダイナミクス”, 2012 年秋季第 73 回応用物理学会学術講演会, 松山市, 2012/9/14.
8. 西原大志(京大化研), 岡野真人, 山田泰裕, 金光義彦, “正孔ドーピングされた単層カーボンナノチューブにおける励起子・荷電励起子の緩和ダイナミクス”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜市, 2012/9/19.
 9. 樹本好央(京大化研), 岡野真人, 金光義彦, “単層カーボンナノチューブにおけるバンドギャップリノーマリゼーション”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜市, 2012/9/19.
 10. 岡野真人(京大化研), 上田 慧, 太野垣健, 福田真俊, 藤井 稔, 金光義彦, “ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ナノ粒子における多重励起子生成”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜市, 2012/9/20.
 11. D. Tex(京大化研), 神谷 格, 金光義彦, “Size dependence of upconversion efficiency in InAs quantum structures”, 豊田工業大学局所構造制御研究センター 第 3 回シンポジウム, 名古屋市, 2012/10/5.
 12. 西原大志(京大化研), 岡野真人, 山田泰裕, 金光義彦, “正孔ドーピングされた単層カーボンナノチューブにおける励起子・荷電励起子の生成・緩和ダイナミクス”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島県, 2013/3/26.
 13. 井原章之(京大化研), 佐藤良太, 寺西利治, 金光義彦, “単一の CdSe/CdS Dot-in-Rod における時間分解発光分光測定”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島県, 2013/3/27.
 14. 樹本好央(京大化研), 岡野真人, 井原章之, 金光義彦, “発光励起分光によるカーボンナノチューブの高リドベルグ励起子とトリオンの観測”, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島県, 2013/3/28.
 15. D. Tex(京大化研), 神谷 格, 金光義彦, “Relative strength of upconversion through Auger, thermal and two-step two-photon-absorption processes in InAs quantum structures”, 2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川県, 2013/3/28.
 16. 岡野真人(京大化研), 高林悠太郎, 櫻井岳暁, 秋本克洋, 古江重紀, 柴田 肇, 仁木 栄, 金光義彦, “ $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ 薄膜試料における超高速光キャリアダイナミクス”, 2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川県, 2013/3/28.
 17. 朱琳(東大物性研), 金昌秀, 吉田正裕, 陳少強, 佐藤慎太郎, 秋山英文, 金光義彦(京大化研), “2 接合タンデム太陽電池効率の内部発光量子収率依存性”, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 京田辺市, 2013/9/27.
 18. 西原大志(京大化研), 瀬川泰知, 伊丹健一郎, 金光義彦, “一次元ナノリング・シクロパラフェニレンにおける励起状態ダイナミクスのサイズ依存性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島県, 2013/9/25.
 19. 山田泰裕(京大化研), Tex David, 神谷格, 金光義彦, “フェムト秒励起光伝導関連法による InAs 量子構造の光キャリアダイナミクス”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島県, 2013/9/26.
 20. 井原章之(京大化研), 佐藤良太, 寺西利治, 金光義彦, “CdSe/CdS Dot-in-Rod における単一光子生成と発光明滅”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島県, 2013/9/26.
 21. 岡野真人(京大化研), 坂本雅典, 寺西利治, 金光義彦, “Type II CdS/CdTe ナノペンシル構造における電荷移動ダイナミクス”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島県, 2013/9/26.
 22. L. Q. Phuong (京大化研), M. Okano, A. Nagaoka, K. Yoshino, Y. Kanemitsu, “Photoluminescence dynamics of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島県, 2013/9/27.
 23. D. Tex(京大化研), I. Kamiya, Y. Kanemitsu, “Photon and carrier upconversion via Auger processes using InAs nanodisks under weak excitation regime”, 豊田工業大学局所構造制御研究センターシンポジウム, 名古屋市, 2013/11/15.
 24. 山田泰裕(京大化研), 中村透, 遠藤克, 若宮淳志, 金光義彦, “鉛ハライド系プロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の光学特性”, 第 23 回日本 MRS 年次大会, 横浜市, 2013/12/09.
 25. 山田泰裕(京大化研), David Tex, 神谷 格, 金光義彦, “InAs 量子構造を利用した中間バンド型太陽電池におけるフェムト秒時間分解光伝導測定”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会

- 演会, 相模原市, 2014/3/17.
26. 岡野真人(京大化研), 高林悠太郎, 櫻井岳暁, 秋本克洋, 柴田 肇, 仁木 栄, 金光義彦, “Cu(In,Ga)Se₂ 薄膜試料におけるフェムト秒ホットキャリアダイナミクス”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/17.
 27. 岡野真人(京大化研), 坂本雅典, 寺西利治, 金光義彦, “CdS/CdTe ナノ粒子のヘテロ界面における電荷分離メカニズム”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/18.
 28. 山田泰裕(京大化研), 中村 透, 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “多孔質チタニア電極上に作製した鉛ハライド系ペロブスカイト太陽電池材料 CH₃NH₃PbI₃ のバンド端光学特性”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/18.
 29. Quang Phuong Le(京大化研), 岡野真人, 山田泰裕, 永岡 章, 吉野賢二, 金光義彦, “Near band-edge optical responses in Cu₂ZnSnS₄ single crystals”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/18.
 30. Quang Phuong Le(京大化研), 岡野真人, 山田泰裕, 永岡 章, 吉野賢二, 金光義彦, “Photocurrent recombination dynamics in Cu₂ZnSnS₄ single crystals”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/18.
 31. 朱 琳(東大物性研), 望月敏光, 吉田正裕, 陳 少強, 金 昌秀, 佐藤慎太郎, 秋山英文, 金光義彦(京大化研), “多接合タンデム太陽電池効率の拡張詳細平衡理論”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/19.
 32. 朱 琳(東大物性研), 望月敏光, 吉田正裕, 陳 少強, 金 昌秀, 佐藤慎太郎, 秋山英文, 金光義彦(京大化研), “多接合タンデム太陽電池の変換効率と最適設計の内部発光効率依存性”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/19.
 33. 井原章之(京大化研), David Tex, 神谷 格, 金光義彦, “InAs/AlGaAs 量子構造からなる中間バンド型太陽電池の顕微光電流イメージング”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/19.
 34. David Tex(京大化研), 神谷 格, 金光義彦, “Two-beam photocurrent mapping to determine the limiting factor of the two-step two-photon-absorption processes in InAs quantum dots”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 相模原市, 2014/3/19.
 35. 西原大志(京大化研), 瀬川泰知, 伊丹健一郎, 金光義彦, “リングエキシトン: ナノリング・シクロパラフェニレンにおける励起子状態”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 平塚市, 2014/3/27.
 36. 井原章之(京大化研), 佐藤良太, 寺西利治, 金光義彦, “単一 CdSe/CdS Dot-in-Rod における発光明滅: 寿命と偏光の同時測定”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 平塚市, 2014/3/30.
 37. 岡野真人(京大化研), 高林悠太郎, 櫻井岳暁, 秋本克洋, 柴田 肇, 仁木 栄, 金光義彦, “多元薄膜太陽電池材料 Cu(In,Ga)Se₂ における光キャリアダイナミクス”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 愛知県, 2014/9/7.
 38. 山田泰裕(京大化研), David M. Tex, 神谷 格, 金光義彦, “フェムト秒光電流分光による InAs 量子構造のキャリアアップコンバージョン過程と電子・正孔寿命の決定”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 愛知県, 2014/9/9.
 39. 西原大志(京大化研), 小野雅司, 田原弘量, 金光義彦, “コロイド量子ドット薄膜におけるマルチエキシトン生成: エキシトンダイナミクスとキャリア生成”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/17.
 40. 吉田正裕(東大物性研), 陳 少強, 朱 琳, 望月敏光, 金 昌秀, 秋山英文, 今泉 充, 金光義彦(京大化研), “エレクトロルミネッセンス絶対光量計測による InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池のサブセル特性評価”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
 41. 朱 琳(東大物性研), 陳 少強, 吉田正裕, 望月敏光, 金 昌秀, 秋山英文, 今泉 充, 金光義彦(京大化研), “Analysis of Internal-luminescence-quantum-yield of Subcells in InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells and their influence on energy conversion efficiencies”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.

42. David Tex (京大化研), 井原章之, 秋山英文, 今泉 充, 金光義彦 (京大化研), “Subcell carrier collection efficiencies in multijunction solar cells determined by time-resolved photoluminescence”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
43. Phuong Le Quang (京大化研), M. Okano, G. Yamashita, T. Morimoto, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, M. Nagai, M. Ashida, Y. Kanemitsu, “Free carrier dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals investigated by optical pump - THz probe spectroscopy”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
44. 山田琢允 (京大化研), 山田泰裕, 西村秀隆, 若宮淳志, 金光義彦, “フェムト秒白色ポンプ・プローブ過渡反射測定によるペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 単結晶の光キャリア再結合ダイナミクス”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
45. 山田泰裕 (京大化研), 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “ハライド系ペロブスカイト太陽電池材料 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 薄膜における光キャリア再結合ダイナミクス”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
46. 山田泰裕 (京大化研), 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 太陽電池における室温アニーリングの影響と発光ダイナミクスとの相関”, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌市, 2014/9/18.
47. 岡野真人 (京大化研), 遠藤 克, 若宮淳志, 吉田正裕, 秋山英文, 金光義彦, “鉛ハライド系ペロブスカイト太陽電池の電界発光測定による特性評価”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/14.
48. 山田泰裕 (京大化研), 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “時間分解発光分光による $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ペロブスカイト太陽電池の電荷分離ダイナミクスの研究”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/14.
49. 山田琢允 (京大化研), 山田泰裕, 西村秀隆, 中池由美, 遠藤 克, 若宮淳志, 村田靖次郎, 金光義彦, “鉛ハライドペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶における光キャリア再結合ダイナミクス”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/14.
50. 吉田正裕 (東大物性研), 朱 琳, 金 昌秀, 秋山英文, 陳 少強, 望月敏光, 久保田英博, 中村徹哉, 今泉 充, 金光義彦 (京大化研), “多接合太陽電池のエレクトロルミネッセンス絶対光量画像計測”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/14.
51. D. Tex (京大化研), H. Akiyama, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, “Contribution of absorption and recombination losses in subcell photocurrent-spectra determined by wavelength-dependent time-resolved photoluminescence”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/14.
52. D. Tex (京大化研), K. Akahane, Y. Kanemitsu, “Negative two-step two-photon-absorption photocurrent induced by infrared photons in quantum dots: dot density dependence”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/13.
53. 岡野真人 (京大化研), 櫻井岳暁, 秋本克洋, 柴田 肇, 仁木 栄, 金光義彦, “ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ における光キャリアの緩和及び拡散ダイナミクス”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/13.
54. L. Q. Phuong (京大化研), M. Okano, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, A. Nagaoka, K. Yoshino, Y. Kanemitsu, “Suppression of nonradiative recombination centers in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals by sodium doping”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/12.
55. L. Q. Phuong (京大化研), M. Okano, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, A. Nagaoka, K. Yoshino, Y. Kanemitsu, “Photocarrier dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ single crystals: Composition dependence”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/12.
56. 金 昌秀 (東大物性研), 望月敏光, 朱 琳, 陳 少強, 吉田正裕, 高遠秀尚, 秋山英文, 金光義彦 (京大化研), “絶対 EL 画像測定による太陽電池の開放電圧マッピング”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/12.
57. 望月敏光 (東大物性研), 金 昌秀, 朱 琳, 陳 少強, 吉田正裕, 高遠秀尚, 秋山英文, 金

- 光義彦(京大化研), “エレクトロルミネッセンス定量画像測定による太陽電池の開放電圧評価”, 2015 年第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 2015/3/12.
58. 田原弘量(京大化研), 金光義彦, “位相ロックパルスを用いた GaAs の光電流制御”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/3/24.
 59. 吉田正裕(東大物性研), 陳 少強, 朱 琳, 望月敏光, 金 昌秀, 秋山英文, 久保田英博, 今泉 充, 金光義彦(京大化研), “多接合型太陽電池のサブセル性能評価に向けたエレクトロルミネッセンス絶対光量計測”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015/3/24.
 60. 井原章之(京大化研), 金光義彦, “単一 CdSe/ZnS ナノ粒子における室温励起子と励起子分子の定量発光測定”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 61. 広重 直(京大化研), 井原章之, 金光義彦, “単一 CdSeTe/ZnS ナノ粒子における近赤外時間分解発光測定”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 62. 半田岳人(京大化研), 田原弘量, 嶋崎 愛, 阿波連知子, 若宮淳志, 金光義彦, “鉛ハライドペロブスカイト太陽電池の電界発光”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 63. Le Quang Phuong(京大化研), G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, N. Maruyama, T. Aharen, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Photocarrier dynamics in perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin films revealed by time-resolved THz spectroscopy”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 64. 山田琢允(京大化研), 山田泰裕, 西村秀隆, 中池由美, 若宮淳志, 村田靖次郎, 金光義彦, “臭化鉛ペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶における光キャリア拡散・再結合ダイナミクス”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 65. David M. Tex(京大化研), H. Akiyama, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, “Bias-voltage dependence of time-resolved photoluminescence decays in solar cells”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/14.
 66. L. Zhu (Univ. Tokyo), Y. Masahiro, C. Shaoqiang, M. Toshimitsu, K. Changsu, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), H. Akiyama, “Dependence of internal radiative efficiencies on radiative damages in multi-junction tandem solar cells via absolute electroluminescence measurements”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/14.
 67. 中村徹哉(JAXA), 今泉 充, 吉田正裕, 秋山英文(東大物性研), “フォトルミネッセンス絶対強度による太陽電池の開放電圧評価法”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/15.
 68. 吉田正裕(東大物性研), 朱 琳, 金 昌秀, 秋山英文, 陳 少強, 望月敏光, 久保田英博, 中村徹哉, 今泉充, 金光義彦(京大化研), “多接合太陽電池のエレクトロルミネッセンス絶対光量画像計測 II”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/9/14.
 69. 井原章之(京大化研), 金光義彦, “発光励起分光法による単一 CdSe/ZnS ナノ粒子の吸収スペクトル精密測定”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/16.
 70. 田原弘量(京大化研), 金光義彦, “位相ロックパルス光電流分光法による GaAs のキャリア生成機構の研究”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/16.
 71. 金光義彦(京大化研), “集光型ヘテロ構造太陽電池における非輻射再結合損失の評価と制御”, CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域 平成 27 年度 第 4 回公開シンポジウム・プログラム, 豊田工業大学, 2016/2/4.
 72. 田原弘量(京大化研), 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “位相ロックパルス光電流ビート分光法による鉛ハライドペロブスカイト薄膜の光電流生成機構の研究”, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016/3/19.
 73. 井原章之(京大化研), 金光義彦, “単一 CdSe/ZnS ナノ粒子の発光強度相関測定: 励起子分子の生成とカスケード発光過程”, 日本物理学会, 第 71 回年次大会, 東北学院大学,

- 2016/3/19.
74. 広重 直(京大化研), 井原章之, 金光義彦, “時間分解発光強度相関測定による単一ナノ粒子中の励起子分子オージェ再結合過程の研究”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/20.
 75. David M. Tex(京大化研), T. Ihara, T. Nakamura, M. Imaizumi, T. Ohshima, Y. Kanemitsu “Analysis of subcell damage in proton irradiated triple-junction solar cells with time-resolved photoluminescence”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/20
 76. 山田琢允(京大化研), 中池由美, 若宮淳志, 金光義彦, “ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶の時空間分解発光ダイナミクス”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/21.
 77. Le Quang Phuong(京大化研), Y. Nakaike, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Exciton dynamics in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/21.
 78. 山下大喜(京大化研), 半田岳人, 山田琢允, 井原章之, 田原弘量, 嶋崎 愛, 若宮淳志, 金光義彦, “発光・光電流の顕微イメージング分光によるハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池のキャリアダイナミクスの研究”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/21.
 79. 半田岳人(京大化研), Tex David, 田原弘量, 嶋崎 愛, 阿波連知子, 若宮淳志, 金光義彦, “発光分光によるハロゲン化鉛ペロブスカイト太陽電池の劣化機構研究”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/22.
 80. 吉田正裕(東大物性研), 朱 琳, 金 昌秀, 久保田英博, 中村徹哉, 今泉 充, 金光義彦(京大化研), 秋山英文, “多接合太陽電池エレクトロルミネッセンス定量計測の測定精度評価”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/20.
 81. 山下元気(阪大基礎工), 松原英一, 永井正也, 金 昌秀, 秋山英文(東大物性研), 金光義彦(京大化研), 芦田昌明, “テラヘルツ分光による GaAs 太陽電池内部の光励起キャリア評価”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2016/3/20.
 82. 金光義彦(京大化研), “ハロゲン化鉛ペロブスカイトの光物理”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市, 2016/9/13.
 83. 半田岳人(京大化研), Tex David M, 嶋崎 愛, 若宮淳志, 金光義彦, “時間分解発光および光電流測定を用いた鉛ハライドペロブスカイト太陽電池ヘテロ界面におけるキャリア注入機構の研究”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市, 2016/9/14.
 84. 山田琢允(京大化研), 中池由美, 若宮淳志, 金光義彦, “時間分解発光分光による $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ 単結晶の光キャリアダイナミクス”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市, 2016/9/15.
 85. 鎗田直樹(京大化研), 田原弘量, 井原章之, 川脇徳久, 佐藤良太, 猿山雅亮, 寺西利治, 金光義彦, “ CsPbBr_3 ペロブスカイトナノ粒子の作製と光学特性”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市, 2016/9/15.
 86. 安島由朗(千葉工大), 石黒晴香, 金子大和, 加藤芳紀, 朱 琳, 吉田正裕, 秋山英文(東大物性研), 代 盼, 陆 书龙, 内田史朗, “EL 絶対値測定による $\text{InGaP/GaAs/InGaAsP/InGaAs}$ 太陽電池の評価”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟市, 2016/9/15.
 87. 井原章之(京大化研), 佐藤良太, 寺西利治, 金光義彦, “発光励起分光法による単一 CdSe/CdS dot-in-rod の光吸収の研究”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016/9/14.
 88. 田原弘量(京大化研), 坂本雅典, 寺西利治, 金光義彦, “ PbS 量子ドットにおける多重励起子の 1 ステップ・2 ステップ生成機構”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016/9/14.
 89. 宮川敬太(阪大院基礎工), 山下元気, 永井正也, 金 昌秀, 秋山英文(東大物性研), 金光

義彦(京大化研), 芦田昌明, “GaAs 半導体から放射される THz 電磁波のドーピング量依存性”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016/9/15.

90. 挾間優治(東大物性研), 石田行章, 朱琳, 金昌秀, 辛埴, 秋山英文, “光電子分光法を利用した太陽電池光起電力の高速ダイナミクスの観測”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学・豊中キャンパス, 2017/3/19.

〈国際〉

1. M. Okano (Kyoto Univ.) and Y. Kanemitsu, “Mechanism of photoluminescence enhancement of single-walled carbon nanotubes by chemical doping”, Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12), Nara, Japan, 2012/6/4.
2. T. Nishihara (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada and Y. Kanemitsu, “Exciton Recombination Dynamics in Hole-doped Single-walled Carbon Nanotubes”, Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12), Nara, Japan, 2012/6/4.
3. Y. Yamada (Kyoto Univ.) and Y. Kanemitsu, “Photocarrier Recombination Dynamics in Rutile and Anatase TiO₂” Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA12), Nara, Japan, 2012/6/7.
4. D. Tex (Kyoto Univ.), I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “The Quantum Well Island - A New Candidate for Intermediate State Solar Cell Quantum Structures”, 2012 Materials Research Society Fall Meeting (2012 MRS Fall), Boston, USA, 2012/11/28.
5. T. Nishihara (Kyoto Univ.), Y. Kimoto, M. Okano, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Exciton Decay Dynamics in Hole-Doped Single-Walled Carbon Nanotubes”, Seventh International conference on Molecular Electronics and Bioelectronics(M&BE7) Fukuoka, Japan, 2013/3/18.
6. D. Tex (Kyoto Univ.), I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Design concept for efficient intermediate band solar cells based on multicarrier Auger processes”, E-MRS 2013 Spring Meeting, Strasbourg, France, 2013/5/27.
7. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Nishihara, M. Okano, and Y. Kanemitsu, “Quantized Exciton-hole Recombination in Hole-doped Single-walled Carbon Nanotubes”, The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2013), Kanazawa, Japan, 2013/6/18.
8. I. Kamiya (Toyota Tech. Inst.), D. Tex, K. Shimomura, F. Yamada, K. Takabayashi, and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “InAs Quantum Well Islands - a Novel Structure For Photon Up-conversion From the Near IR To the Visible”, 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC39) Tampa, USA, 2013/6/20.
9. Y. Yamada (Kyoto Univ.) and Y. Kanemitsu, “Recombination dynamics of photoexcited electrons and holes in rutile and anatase TiO₂”, The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 18), Shimane, Japan, 2013/7/24.
10. T. Nakamura (Kyoto Univ.), Y. Yamada, S. Yasui, H. Funakubo, and Y. Kanemitsu, “Dynamics of photogenerated carriers in ferroelectric BiFeO₃ thin films, The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors”, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 18), Shimane, Japan, 2013/7/24.
11. D. M. Tex (Kyoto Univ.), T. Ihara, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Temperature dependence of highly efficient photocurrent generation in shallow InAs quantum structures”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013/9/17.
12. T. Nakamura (Kyoto Univ.), Y. Yamada, S. Yasui, H. Funakubo, and Y. Kanemitsu, “Ultrafast Photoresponses in Ferroelectric BiFeO₃ Thin Films”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013/9/17.
13. M. Okano (Kyoto Univ.), T. Nishihara, Y. Kimoto, T. Ihara, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Hole-doping modulates electronic structures of single-walled carbon nanotubes”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013/9/17.
14. Y. Yamada (Kyoto Univ.), H. Sato, Y. Hikita, H. Y. Hwang, and Y. Kanemitsu, “Carrier

- Recombination Dynamics at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterointerface”, 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 2013/9/19.
15. D. M. Tex (Kyoto Univ.), T. Ihara, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Spectroscopic Imaging of Efficient Photocurrent Generation Sites in InAs Intermediate Band Quantum Structures: Improved Design of Upconversion Layers Containing Nanodisks and Quantum Dots”, 2013 MRS Fall meeting, Boston, USA, 2013/12/2.
 16. Y. Yamada (Kyoto Univ.), D. M. Tex, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Femtosecond photocurrent dynamics in InAs quantum structures for intermediate-band solar cells”, 2013 MRS Fall meeting, Boston, USA, 2013/12/2.
 17. Y. Yamada (Kyoto Univ.), H. K. Sato, Y. Hikita, H. Y. Hwang, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier recombination and localization dynamics of $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterostructures”, SPIE Photonics West 2014, San Francisco, 2014/2/2.
 18. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Temperature dependence of photoluminescence dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals”, 2014 MRS Spring meeting, San Francisco, USA, 2014/4/23.
 19. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Fundamental optical properties of solution-processed $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2$ solar cells”, 2014 MRS Spring meeting, San Francisco, USA, 2014/4/24.
 20. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Photoelectronic Responses in Solution-Processed Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Solar Cell Studied by Photoluminescence and Photoabsorption Spectroscopy”, 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 40), Denver, USA, 2014/6/10.
 21. L. Zhu (Univ. Tokyo), T. Mochizuki, M. Yoshita, S. Chen, S. Sato, C. Kim, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, “Conversion Efficiency Limits and Optimized Designs for Tandem Solar Cells with Realistic Sub-cell Material Quality”, 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 40), Denver, USA, 2014/6/12.
 22. D. Tex (Kyoto Univ.), I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Identification of trap states for two-step two-photon-absorption processes in InAs quantum structures for intermediate-band solar cells”, 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 40), Denver, USA, 2014/6/13.
 23. S. Chen (Univ. Tokyo), L. Zhu, M. Yoshita, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, T. Nakamura, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Strongly-carrier-density-dependent Luminescent Coupling in Multi-junction Tandem Solar Cells Revealed via Absolute-electroluminescence efficiency Measurements”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan, 2014/11/26.
 24. Y. Yamada (Kyoto Univ.), M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Room-Temperature Annealing Effect in Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Solar Cells Revealed by Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy”, 2014 MRS Fall Meeting, Boston, USA, 2014/12/12.
 25. M. Okano, Y. Takabayashi, T. Sakurai, K. Akimoto, H. Shibata, S. Niki, and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Ultrafast Photocarrier Dynamics in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Thin Films Studied Using Optical Spectroscopy Techniques”, 2015 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 2015/4/7.
 26. T. Yamada (Kyoto Univ.), Y. Yamada, L. Q. Phuong, M. Endo, H. Nishimura, Y. Nakaike, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Optical Spectra and Dynamics of Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Single Crystals”, 2015 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 2015/4/8.
 27. M. Yoshita (Univ. Tokyo), L. Zhu, C. Kim, H. Akiyama, S. Chen, T. Mochizuki, H. Kubota, T. Nakamura, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, “Absolute Electroluminescence Imaging of Multi-Junction Solar Cells and Calibration Standards”, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, LA, USA, 2015/6/16.
 28. D. M. Tex (Kyoto Univ.), T. Ihara, H. Akiyama, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, “Determining Subcell Carrier-Collection Efficiencies of Triple-Junction Solar Cells Using Time-Resolved Photoluminescence”, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, LA, USA, 2015/6/16.
 29. L. Zhu (Univ. Tokyo), M. Yoshita, S. Chen, T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, H. Akiyama, “Characterizations of radiation damages in multi-junction solar cells focused on subcell internal luminescence quantum yields via absolute electroluminescence

- measurements”, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, LA, USA, 2015/6/18.
30. H. Akiyama (Univ. Tokyo), “Absolute electroluminescence measurements of multi-junction solar cells and calibration standards”, 18th International Workshop on Space Solar Cell Calibration and Measurement Techniques, Miramar Beach, FL, USA, 2015/6/22-24.
 31. T. Nishihara (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Recombination dynamics of the lowest-energy excitons in single-walled carbon nanotubes under resonant and nonresonant excitation”, Eighth International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE8), Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, 2015/6/23.
 32. H. Tahara (Kyoto Univ.) and Y. Kanemitsu, “Photocurrent Coherent Control in GaAs Using Femtosecond Phase-locked Pulses”, 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015) , Munich, Germany, 2015/6/25.
 33. T. Mochizuki (Univ. Tokyo), C. Kim, M. Yoshita, J. Mitchell, Z. Lin, S. Chen, H. Takato, Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), H. Akiyama, “Voc Evaluation of Solar Cells and Modules Using Absolute EL Images”, European PV Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 2015/9/14-18.
 34. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Yamada, L. Q. Phuong, N. Maruyama, H. Nishimura, A. Wakamiya, Y. Murata, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier Diffusion Dynamics of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Single Crystals Revealed by Multiphoton Excitation Spectroscopy”, 1st International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2015) , Lausanne, Switzerland, 2015/9/29.
 35. H. Akiyama (Univ. Tokyo), “Accuracy of internal-voltage evaluations in multi-junction solar cells via electroluminescence”, The 25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Busan, Korea, 2015/11/15-20.
 36. L. Zhu (Univ. Tokyo), M. Yoshita, T. Nakamura, M. Imaizumi, C. Kim, T. Mochizuki, S. Chen, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, “Characterization and modeling of radiation damages via internal radiative efficiency in multi-junction solar cells”, SPIE Photonics West San Francisco, San Francisco, USA, 2016/2/16.
 37. M. Yoshita (Univ. Tokyo), L. Zhu, C. Kim, T. Mochizuki, T. Nakamura, M. Imaizumi, S. Chen, H. Kubota, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, “Calibration standards and measurement accuracy of absolute electroluminescence and internal properties in multi-junction and arrayed solar cells”, SPIE Photonics West San Francisco, San Francisco, USA, 2016/2/15.
 38. T. Yamada (Kyoto Univ.), Y. Yamada, H. Nishimura, Y. Nakaike, A. Wakamiya, Y. Murata, and Y. Kanemitsu, “Long-Range Diffusion and Recombination of Free Carriers in Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Single Crystals”, 2016 MRS Spring meeting Phoenix, Phoenix, USA, 2016/3/30.
 39. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Yamada, N. Maruyama, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Rapid Photocarrier Trapping in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -Based Solar Cells as Revealed by Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy”, 2016 MRS Spring meeting Phoenix, USA, 2016/3/30.
 40. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), J. K. Katahara, G. Yamashita, M. Nagai, M. Ashida, H. W. Hillhouse, Y. Kanemitsu, “Impact of alkali doping on carrier transport in $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ thin films for solar cell applications”, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, USA, 2016/6/6.
 41. D. M. Tex (Kyoto Univ.), T. Nakamura, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Universal Behavior of Time-resolved Photoluminescence Decays in III-V Solar Cells: Comparison of Subcell Current Generation Dynamics”, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, USA, 2016/6/7.
 42. L. Zhu (Univ. Tokyo), M. Yoshita, T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, “Current leakage and fill factor in multi-junction solar cells linked via absolute electroluminescence characterization”, 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, USA, 2016/6/7.
 43. M. Yoshita (Univ. Tokyo), L. Zhu, C. Kim, H. Kubota, T. Nakamura, M. Imaizumi, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama, “Accuracy Evaluations for Standardization of Multi-Junction Solar-Cell Characterizations via Absolute Electroluminescence”, 43rd IEEE Photovoltaic

- Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, USA, 2016/6/10..
44. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), Y. Nakaike, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Exciton dynamics in perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ single crystals”, The 19th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'16), Paris, France, 2016/7/19.
 45. T. Handa(Kyoto Univ.), D. Tex, A. Shimazaki, T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Mechanism of Voltage-Accelerated Degradation in Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Solar Cells Revealed by Time-Resolved Photoluminescence and Electroluminescence Spectroscopy” 2016 MRS Fall meeting, Boston, USA, 2016/12/1.
 46. H. Tahara(Kyoto Univ.), M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Highly Sensitive Detection of Non-Radiative Localized States in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Thin Films by Photocurrent Beat Spectroscopy” 2016 MRS Fall meeting, Boston, USA, 2016/11/30.
 47. T. Yamada(Kyoto Univ.), Y. Yamada, Y. Nakaike, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Photon Recycling in Lead Halide Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Single Crystals Studied by Time-Resolved Two-Photon-Excitation Microscopy” 2016 MRS Fall meeting, Boston, USA, 2016/11/30.

③ ポスター発表 (国内会議 16 件, 国際会議 21 件)

1.発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

〈国内〉

1. 金光義彦(京大化研), 秋山英文, “ナノ構造太陽電池におけるキャリア多体効果とエネルギー損失抑制”, 第 10 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 金沢, 2013/5/23.
2. Quang Phuong Le(京大化研), 岡野真人, 山田泰裕, 永岡 章, 吉野賢二, 金光義彦, “ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 単結晶における光生成キャリアの緩和及び局在ダイナミクス”, 第 11 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 宮崎県, 2014/7/3.
3. 金光義彦(京大化研), 朱琳, 吉田正裕, 陳 少強, 金 昌秀, 望月敏光, 秋山英文, “拡張詳細平衡理論による多接合太陽電池の変換効率の評価”, 第 11 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, 宮崎県, 2014/7/3.
4. 山田琢允(京大化研), 山田泰裕, L. Q. Phuong, 西村秀隆, 遠藤 克, 若宮淳志, 金光義彦, “薄膜太陽電池材料鉛ハライドペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ 単結晶における光キャリア再結合ダイナミクス”, 第 25 回光物性研究会, 大阪市立大学, 2014/12/13.
5. David M. Tex(京大化研), “アップコンバージョン型量子ドット太陽電池”, 国際光年記念シンポジウム, 東京大学安田講堂, 2015/4/21.
6. 井原章之(京大化研), “単一分光が明らかにするナノ粒子の励起子発光特性”, 国際光年記念シンポジウム, 東京大学安田講堂, 2015/4/21.
7. 吉田正裕(東大物性研), “EL 絶対値計測による多接合太陽電池の発光量子効率評価と性能診断”, 物性研究所短期研究会, 東京大学物性研究所, 2015/6/24-26.
8. 山田琢允(京大化研), 山田泰裕, Le Quang Phuong, 丸山直輝, 西村秀隆, 中池由美, 若宮淳志, 村田靖次郎, 金光義彦, “ハロゲン化鉛ペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3(\text{X}=\text{I}, \text{Br})$ 単結晶における光キャリアの拡散・再結合ダイナミクス”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/18.
9. 伊吹博人(京大化研), 井原章之, 金光義彦, “単一 CdSe/ZnS ナノ粒子の電荷ゆらぎと発光明滅・スペクトル拡散”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015/9/18.
10. 井原章之(京大化研), 佐藤良太, 寺西利治, 金光義彦, “時間分解光子相関解析による単一ナノ発光材料の物性研究”, 第 26 回光物性研究会, 神戸大学, 2015/12/12.
11. 広重直(京大化研), 井原章之, 金光義彦, “単一 CdSeTe/ZnS ナノ粒子における発光の強度相関測定”, 第 26 回光物性研究会, 神戸大学, 2015/12/12.
12. 半田岳人(京大化研), 岡野真人, 阿波連知子, 若宮淳志, 金光義彦, “鉛ハライドペロブスカイト太陽電池の特性劣化メカニズム”, 第 26 回光物性研究会, 神戸大学, 2015/12/12.
13. 山田琢允(京大化研), 山田泰裕, 中池由美, 若宮淳志, 金光義彦, “時間分解 2 光子励起発光顕微分光による $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 単結晶の光キャリア拡散・再結合の研究”, 第 26 回光物性研究会, 神戸大学, 2015/12/12.

14. 広重直(京大化研), 井原章之, 猿山雅亮, 寺西利治, 金光義彦, “単一 CdSe/CdS ナノ粒子におけるカスケード発光分光: クーロン相互作用による励起子分子発光増大” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016/9/15.
15. 宮川敬太(阪大院基礎工), 山下元気, 永井正也, 金昌秀, 秋山英文, 金光義彦(京大化研), 芦田昌明, “GaAs 半導体から放射される THz 電磁波のドーピング依存性” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016/9/15.
16. 半田岳人(京大化研), D. M. Tex, 嶋崎愛, 若宮淳志, 金光義彦, “鉛ハライドペロブスカイト太陽電池ヘテロ界面における電荷注入過程” 第 1 回フロンティア太陽電池セミナー, 京都大学化学研究所, 2016/11/17.

〈国際〉

1. T. Nishihara (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, and Y. Kanemitsu, “Recombination dynamics of excitons and trions in hole-doped single-walled carbon nanotubes”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012), Zurich, Switzerland, 2012/8/2.
2. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals: The role of band tail states”, 2014 MRS Spring meeting, San Francisco, USA, 2014/4/24.
3. M. Okano (Kyoto Univ.), M. Sakamoto, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, “Charge separation dynamics in type-II CdS/CdTe heteronanopencils revealed by femtosecond pump-probe spectroscopy”, 30 years of colloidal quantum dots, Paris, France, 2014/5/27.
4. T. Ihara (Kyoto Univ.), R. Sato, T. Teranishi, and Y. Kanemitsu, “Relationships between Photoluminescence Spectra, Lifetime, and Polarization Anisotropy on Single Heterostructured Nanocrystals Exhibiting Blinking”, 30 years of colloidal quantum dots, Paris, France, 2014/5/27.
5. S. Chen (Univ. Tokyo), L. Zhu, M. Yoshita, T. Mochizuki, C. Kim, H. Akiyama, M. Imaizumi, and Y. Kanemitsu, “Balance sheets of energy and carriers and subcell characteristics in a InGaP/GaAs/Ge tandem solar cell”, The 40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA, 2014/6/10.
6. M. Okano (Kyoto Univ.), Y. Takabayashi, T. Sakurai, K. Akimoto, H. Shibata, S. Niki, and Y. Kanemitsu, “Photocarrier Dynamics of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Thin Films Revealed by Time-resolved Photoluminescence and Transient Absorption Measurements”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan, 2014/11/25.
7. D. Tex (Kyoto Univ.), T. Ihara, I. Kamiya, and Y. Kanemitsu, “Influence of Trapping Processes on Photocurrent Generation Efficiencies in Quantum-dot Intermediate-band Solar Cells”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan, 2014/11/25.
8. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Optoelectronic Properties of Undoped and Na-doped $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan, 2014/11/26.
9. Y. Yamada (Kyoto Univ.), M. Endo, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Dynamics of Photocarriers in Organic-inorganic Hybrid Perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ for Solar-cell Applications”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan, 2014/11/27.
10. Y. Yamada (Kyoto Univ.), T. Yamada, M. Endo, H. Nishimura, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Fabrication Dependence of Carrier Recombination Rates in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Semiconductors”, 2015 MRS Spring meeting, San Francisco, USA, 2015/4/9.
11. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, and Y. Kanemitsu, “Optoelectronic properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals revealed by optical time-resolved spectroscopy”, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, LA, USA, 2015/6/17.
12. T. Handa (Kyoto Univ.), M. Okano, M. Endo, T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Electroluminescence and Photoluminescence Imaging Spectroscopy of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Solar Cells: Degradation Mechanism”, 1st International Conference on

- Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2015), Lausanne, Switzerland, 2015/9/27-28.
13. T. Handa (Kyoto Univ.), T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Device performance degradation of perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells induced by bias voltage”, The 5th International Conference on MEXT Project of Integrated Research on Chemical Synthesis, Nagoya, Japan, 2016/1/29.
 14. T. Handa (Kyoto Univ.), M. Okano, D. M. Tex, A. Shimazaki, T. Aharen, A. Wakamiya, and Y. Kanemitsu, “Carrier injection and recombination processes in perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ solar cells studied by electroluminescence spectroscopy”, SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA, 2016/2/17.
 15. H. Ibuki (Kyoto Univ.), T. Ihara, and Y. Kanemitsu, “Photoluminescence blinking and spectral diffusion of single CdSe/ZnS nanocrystals: charge fluctuation effects”, SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA, 2016/2/17.
 16. N. Hiroshige (Kyoto Univ.), T. Ihara, and Y. Kanemitsu, “Auger Recombination of Biexcitons in Single Semiconductor Nanocrystals Studied by Time-resolved Second-order Photon Correlation Measurements”, 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN17), Nara, Japan, 2016/3/29.
 17. T. Ihara (Kyoto Univ.) and Y. Kanemitsu, “A Relation between Biexciton Cascade and Absorption Cross Section of Single Semiconductor Nanocrystals”, 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN17), Nara, Japan, 2016/3/29.
 18. T. Yamada (Kyoto Univ.), Y. Yamada, Y. Nakaïke, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Impact of Photon Recycling on Optical Responses from $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Single Crystals Revealed by Time-Resolved Multi-Photon-Excitation Microscopy” 2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2016), Genova, Italy, 2016/9/26.
 19. Y. Yamada, T. Yamada, A. Shimazaki, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu (Kyoto Univ.), “Fast Photocarrier Relaxation into Trapping States in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Thin Films as Revealed by Time-Resolved Photoluminescence Spectroscopy” 2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2016), Genova, Italy, 2016/9/26.
 20. L. Q. Phuong (Kyoto Univ.), Y. Yamada, M. Nagai, Y. Nakaïke, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Photocarrier recombination dynamics in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite thin films at low temperatures” 2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2016), Genova, Italy, 2016/9/26.
 21. T. Handa (Kyoto Univ.), D. Yamashita, T. Ihara, H. Tahara, A. Shimazaki, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, “Carrier Injection at Interfaces and Recombination in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ Perovskite Solar Cells Studied by Microscopic Photoluminescence and Photocurrent Imaging” 2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (PSCO-2016), Genova, Italy, 2016/9/26.

(4)知財出願

①国内出願 (12 件)

②海外出願 (4 件)

③その他の知的財産権
なし

(5)受賞・報道等

① 受賞

1. David Michael Tex, 第 19 回 京大化研奨励賞, 2014/12/12.
2. 井原章之, 日本学術振興会分子ナノテクノロジー第 174 委員会若手研究者講演賞, , 2015/3/3.
3. 望月敏光, イノベティブ PV 奨励賞, 日本学術振興会, 東京, 2015/5/29.
4. 朱琳, Best Student Paper Award, 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 米国, 2015/6/19.
5. 金光義彦, 応用物理学会論文賞(解説論文賞), 応用物理学会, 名古屋, 2015/9/13.
6. 金光義彦, 応用物理学会論文賞(優秀論文賞), 応用物理学会, 名古屋, 2015/9/13.
7. 伊吹博人, 第 1 回日本物理学会領域 5 学生ポスター優秀賞(国際光年記念ポスター賞), 日本物理学会, 大阪, 2015/9/18.
8. 山田琢允, 第 1 回日本物理学会領域 5 学生ポスター優秀賞(国際光年記念ポスター賞), 日本物理学会, 大阪, 2015/9/18.
9. 山田泰裕, 第 10 回日本物理学会若手奨励賞(領域 5), 2016/3/21.
10. 広重直, 第 2 回日本物理学会領域 5 学生ポスター優秀賞, 2016/9/15.
11. 半田岳人, 第 1 回フロンティア太陽電池セミナー優秀ポスター賞, 2016/11/18.
12. 山田琢允, 第 21 回京大化研学生研究賞, 2016/12/2.

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 日経産業新聞, 2結晶離せば効率発電, 京大 太陽電池の新原理, 2014/2/19.
2. 日刊工業新聞, 効率変換仕組み解明, 京大などナノ構造太陽電池に一步, 2014/2/20.
3. Yahoo ニュース, 近赤外光を効率良く電力変換できる太陽電池の開発に道 - 京大が発見, 2014/2/20.
4. 科学新聞, 中間バンド型太陽電池 光学的・電気的特性を解明, 京大化研・豊田工大グループ, 2014/3/14.
5. 日刊工業新聞, 電気伝導度 10 倍に, 太陽電池向け量子ドット薄膜, 富士フィルム・京大, 2014/5/19.
6. 化学工業日報, 光エネー電気エネ効率変換 量子ドット薄膜で実現, 太陽電池などに応用期待, 富士フィルム・京大, 2014/5/19.
7. 日経産業新聞, 量子ドット太陽電池の変換効率, 間隔制御で向上, 富士フィルム・京大, 2014/5/19.
8. 日刊工業新聞, 半導体中の電子状態の解明, 2014/8/20.
9. 日刊工業新聞, ペロブスカイト単結晶 京大, 光の振る舞い解明, 2015/9/3.
10. 日刊工業新聞, レーザーで材料解析 太陽電池の電力効率評価, 2017/2/8.

③その他

なし

(6) 成果展開事例

①実用化に向けての展開

なし。

②社会還元的な展開活動

- ・研究成果は、研究室のホームページに掲載し、一般に情報提供している
- ・国民との対話を積極的に行うため、下記の行事に参加し、成果を優しく説明している。

1. 京都大学アカデミックデイ:みんなで対話する京都大学の日、京大・百周年時計台記念館、2012/3/10.
2. 京都大学アカデミックデイ:みんなで対話する京都大学の日、京大・百周年時計台記念館、2012/9/2.
3. 夏休み子供科学教室、ホテルに学ぶ光の科学、東葛テクノプラザ、2012/7/24-25.
4. 京大アカデミックデイ:京都大学の研究者とあなたで語り合う日、「未来の太陽電池を考える」、京大・百周年時計台記念館、2013/12/21.
5. 京大アカデミックデイ:みんなで対話する京都大学の日、「未来の太陽電池を創る一言言葉はナノー」、京大・百周年時計台記念館、2014/9/28.
6. 第16回 高校生のための化学—先端高度研究の一端を学ぶ—、「光で探るナノ物質の世界」、京都大学化学研究所、2013/7/27.
7. 第17回 高校生のための化学—先端高度研究の一端を学ぶ—、「見て、触って、作って学ぶ太陽電池の科学」、京都大学化学研究所、2014/7/26.
8. 本研究成果をインターネット(URL; <http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~opt-nano/>)で公開し、一般に情報提供している。

§ 5 研究期間中の活動

5.1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2012.3.10	京都大学アカデミックデイ	京大・百周年時計台記念館		みんなで対話する京都大学の日
2012.7.25-24	夏休み子供科学教室	東葛テクノプラザ		ホテルに学ぶ光の科学
2012.9.2	京都大学アカデミックデイ	京大・百周年時計台記念館		みんなで対話する京都大学の日
2012.9.1	応用物理学会・シンポジウム(企画および講演)	松山市・愛媛大学	約 200 人	シンポジウム「非平衡電子系の新展開 - 精密制御と機能探索」
2012.12.20-22	応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会(企画担当)	長野県・軽井沢・上智大学セミナーハウス	約 40 人	「太陽電池と量子エレクトロニクス—発光デバイス・光物性の研究実績をどう生かすか—」研究会
2013. 7.27	第16回 高校生のための化学	京大・化研		先端高度研究の一端を学ぶ「光で探るナノ物質の世界」

2013.12.21	京都大学アカデミックデイ	京大・百周年時計台記念館		京都大学の研究者とあなたで語り合う日、「未来の太陽電池を考える」
2014.7.26	化学研究所「第17回高校生のための化学－先端高度研究の一端を学ぶ－」	京大・化研		啓蒙活動
2014.9.28	京都大学アカデミックデイ 2014 －みんなで対話する京都大学の日－	京都大学		成果発表

§ 6 最後に

