

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H04648

研究課題名(和文)非発光再結合検出による非破壊三次元評価法の開発と量子ナノ太陽電池の効率向上

研究課題名(英文)Development of the non-destructive and 3-dimensional profile investigation of the non-radiative recombination in the nano-structure inserted solar cells

研究代表者

福山 敦彦 (Fukuyama, Atsuhiko)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：10264368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：GaAs歪緩和層を挿入したSL構造を含む太陽電池サンプルのPLおよびPPT信号の温度解析を行った。SL内量子準位間の電子遷移に伴う発光および非発光再結合信号によるピークが明確に観測されたことから、量子準位に光励起されたキャリアについて4つの緩和過程を考慮したモデルを構築してフィッティングした。その結果、電子と正孔共にトンネリング過程によって量子井戸外へ脱出しやすくなり、結果的にキャリア回収効率が大きく向上することが分かった。光ヘテロダイン光熱変換法を構築してn-Siの表面変位量を測定した。これは熱拡散方程式に境界条件と励起光の光吸収を考慮した差分法による理論計算とよく一致した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子ナノ太陽電池で十分な変換効率を得られていない理由は光吸収層に挿入する量子井戸や量子ドット、超格子構造の物性評価が不十分なためである。これら量子ナノ構造はLEDやLDなど発光デバイスに既に実装されているが、注入キャリアの発光再結合のみに注目したものである。一方、太陽電池では量子ナノ構造内に発生した光励起キャリアの再結合を抑制しつつ数十層もの量子ナノ構造中を輸送させるという非常に複雑なデバイス動作が必要であり、得られた成果は学術的にも非常に興味深い。また、非発光再結合に伴う表面変位量を非接触且つサブナノオーダーで高感度検出できる手法の確立は、様々な学術分野に応用できるポテンシャルを持つ。

研究成果の概要(英文)：The role of a GaAs strain-relaxation interlayer inserted into InGaAs/GaAsP superlattice solar cells was evaluated by measuring the piezo-electric photothermal (PPT) signals. The PPT signals caused by the non-radiative recombination of electrons photo-excited to the first quantized level were observed. The temperature-dependent PPT signal intensities were assessed using an electron carrier relaxation model. Although the non-radiative recombination remained dominant around room temperature, tunneling of carriers through the e2-miniband after thermal excitation from the e1-level increased and became comparable. This implies that the recombination loss of the photo-excited carriers is suppressed by the insertion of the GaAs interlayer. Laser heterodyne photothermal displacement method was developed and adopted to n-type Si. Obtained surface displacements well corresponded to the theoretical calculation results based on the thermal diffusion equation.

研究分野：半導体物性工学

キーワード：非発光再結合過程 超高効率量子ナノ太陽電池 非破壊且つ非接触評価技術 レーザーヘテロダイン検出

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

NEDO 策定の太陽光発電ロードマップ(PV2030+)では変換効率 40%以上の超高効率太陽電池を開発し、汎用電源として利用する社会を構築することが目標である。それを実現するのに必須な技術が、光吸収層に量子井戸や量子ドット、超格子を挿入した量子ナノ太陽電池である。形成される量子準位吸収により太陽光吸収領域を増大させ、ミニバンド内をトンネリング移動させることで再結合なくキャリアを収集し高効率化を実現させる。しかし問題は、未だ良質な量子ドットを高密度且つ均一に積層させることが困難なため、量子ナノ層におけるミニバンド形成やキャリア発生、再結合、輸送といった基礎物性の研究が不十分なことである。

この要因の一つに評価手法の欠落がある。量子ナノ層の評価には発光再結合分光(以下、PL)法が一般的で、マッピング測定でその均一性も評価が可能である一方、発光再結合以外のキャリア素過程を検出できないことや、積層構造のうち表面近傍の信号しか得られない等の欠点がある。つまりは、ナノサイズの量子ドットおよび量子井戸を太陽電池光吸収層に挿入した試料を破壊することなく、その均一性と併せてキャリアダイナミクス(発生・再結合損失・輸送)を高感度に測定できる非破壊三次元評価技術も併せて開発し、量子ナノ構造の最適化設計を提案する事が、変換効率 40%以上の超高効率太陽電池の実現のためには必要である。

### 2. 研究の目的

光ヘテロダイン微小振動測定技術を申請者らがこれまで開発してきた光熱変換分光法に導入することで、変換効率低下の原因となる熱エネルギー損失、つまりキャリアの非発光再結合過程の非破壊非接触且つ高感度な測定を実現する。これを量子ナノ構造太陽電池に適用し、発電動作時のキャリアダイナミクスを明らかにする。加えて、熱エネルギー損失の三次元プロファイルの取得が可能なシステム開発も実施する。つまり非破壊非接触三次元評価術の新規開発と適切な素子構造提案のための有益な知見を得る事が本研究の要旨である。

### 3. 研究の方法

(1)量子ナノ構造太陽電池のキャリアダイナミクスの解明：本研究では InGaAs 井戸層と GaAsP 障壁層の間に数 nm の GaAs 歪緩和層を挿入した SL 構造を提案した。GaAs 歪緩和層挿入によって階段状ポテンシャルが形成され、伝導帯よりも高次のエネルギー準位が形成されるため、キャリアの熱励起脱出は容易になる。このため非発光再結合によるキャリア損失の割合が減少し、量子ナノ領域からのキャリア取り出しが向上すると期待される。ただし、歪緩和層を有する SL 構造内のキャリア輸送過程は従来の太陽電池構造と比べ非常に複雑である。そこで、光吸収で量子準位内に励起された電子と正孔に対して、全ての緩和過程を考慮した速度方程式を構築し、圧電素子光熱変換(PPT)法と PL 法を適用した。

図 1 に試料の概略図を示す。歪緩和層挿入の効果を明らかにするために、*n* 型 GaAs 基板上有機金属気相成長法によって作製した GaAs *p-i-n* 太陽電池構造の光吸収層(*i* 層)に InGaAs/GaAsP SL 構造を 20 周期挿入した 2 種類の試料を用意した。1 つは In<sub>0.21</sub>Ga<sub>0.79</sub>As 井戸層と GaAs<sub>0.58</sub>P<sub>0.42</sub> 障壁層の間に 3.1 nm の GaAs 歪緩和層を挿入した試料(以下、interlayer 試料)である。もう 1 つは GaAs 歪緩和層を持たない試料(以下、no-interlayer 試料)で、GaAs<sub>0.58</sub>P<sub>0.42</sub> 障壁層と In<sub>0.21</sub>Ga<sub>0.79</sub>As 井戸層からなる。また、*i* 層領域の内部電界は 12 kV/cm と計算することができ、二つの SL 構造の違いから電界強度が変化しないよう *i* 層全体の厚さを 1000 nm に固定した。

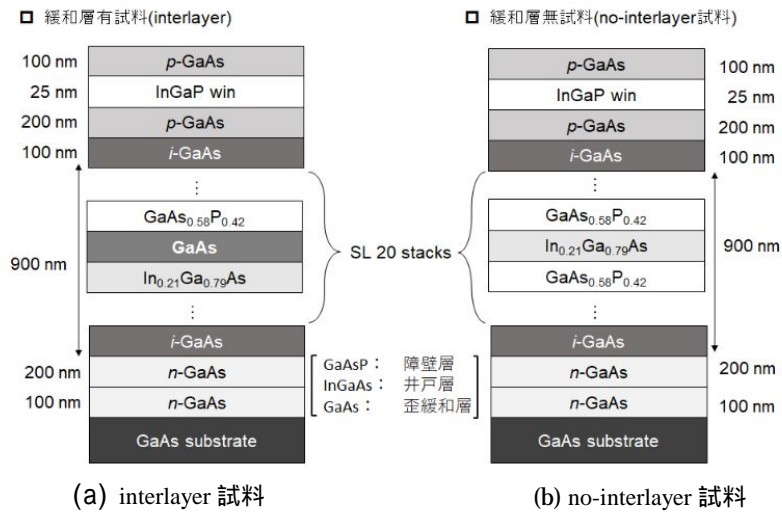


図 1 各試料の試料構造

(2) 非接触且つ非破壊評価手法の開発：光吸収後の発熱によって生じる表面膨張を非接触で検出することが可能な光ヘテロダイン光熱変換 (LH-PT) 法を新規に構築した。本研究では、物性値が既知である  $n$ -Si バルク試料を用意した。励起光には 808 nm のレーザーダイオード (LD) を用い、その励起光周波数 ( $f_{ex}$ ) を 500 ~ 4500 Hz に変化させて表面変位量を測定した。理論計算は熱拡散方程式に境界条件を考慮し、中心差分法と交互方向陰解法を用いて計算した。

#### 4. 研究成果

(1) まず、interlayer 試料と no-interlayer 試料の  $i$  層のバンド構造を nextnano による理論計算によって算出した。interlayer 試料は InGaAs 井戸層と GaAs 歪緩和層からなる階段状のバンド構造となり、理論計算から電子の第 1 量子準位 ( $e1$ ) が InGaAs 井戸層内に形成され、電子の第 2 量子準位 ( $e2$ ) は GaAs 井戸層内に形成された。 $e2$  準位では、隣接する量子井戸へ電子の波動関数が染み出すことでお互いに重複した結果、SL 構造全体にわたってミニバンドが形成された。ミニバンドはそのエネルギーに幅があり、下端と上端のエネルギー値をそれぞれ  $\Gamma$  点と  $\pi$  点として表す。一方、重い正孔の第一量子準位 ( $hh1$ ) が InGaAs 井戸層内に形成され、軽い正孔の第一 ( $lh1$ ) および第二量子準位 ( $lh2$ ) が GaAs 井戸層内に形成された。 $lh1$  と  $lh2$  準位はミニバンド化していた。その結果、光励起された正孔は  $lh1$  ミニバンドをトンネリングすることによって量子井戸層を通り抜けることが可能である。

図 3 に interlayer 試料の PPT スペクトルの 100 ~ 340 K における温度変化を示す。両試料の 300 K のスペクトルに観測された 1.40 eV 付近から立ち上がる信号が GaAs のバンドギャップエネルギー ( $E_g$ , 300 K で 1.42 eV) と一致することから、励起光を照射した試料表面側に存在する  $p$  型 GaAs 層内での光励起およびそれに伴う非発光再結合による PPT 信号と同定した。また、 $E_g$  以下の領域に、interlayer 試料では 1.30 eV の鋭いピーク (ピーク A) が、no-interlayer 試料では 1.29 eV のブロードなピーク (ピーク B) が観測され、これは InGaAs/GaAsP SL に起因した PPT 信号と考えられる。nextnano による理論計算値と比較すると、ピーク A は  $hh1$  準位から  $e1$  準位への電子遷移 (計算値: 1.297 eV) に伴う非発光再結合による信号であると同定した。一方、ピーク B は  $hh1$  準位から  $e1$  ミニバンドの下端である  $\Gamma$  点への電子遷移 (計算値: 1.284 eV) に伴う非発光再結合による信号であると同定した。また、既に報告した PL 解析の結果では、interlayer 試料と no-interlayer 試料の発光ピークはそれぞれ 1.30 と 1.28 eV であり、今回の PPT 測定の結果と一致した。つまり、同一試料において、量子準位間遷移 (interlayer 試料では  $hh1$  準位から  $e1$  準位、

no-interlayer 試料では hh1 準位から e1 ミニバンド)後の発光および非発光再結合信号を、それぞれ PL と PPT 信号として感度よく測定できたことを意味している。

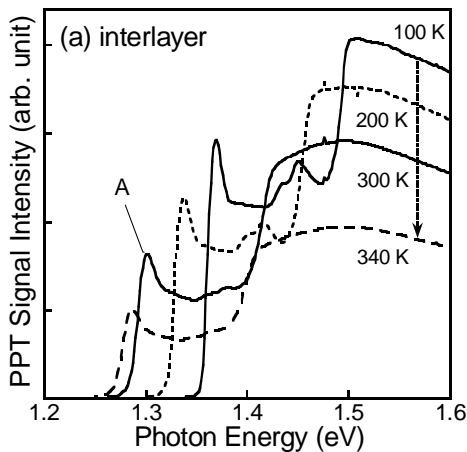


図 3 PPT スペクトル測定の結果

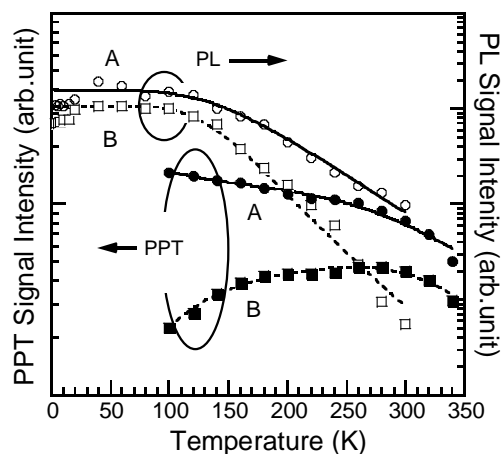


図 4 PPT ピーク強度の温度変化

図 4 にピーク A とピーク B の PPT 信号強度の温度依存性を、それぞれ黒丸と黒四角で示す。温度上昇に伴いピーク A の強度は単調に減少したが、ピーク B の強度は 100-280 K までは温度上昇に伴い増加し、より高温領域 (280-340 K) では減少した。比較のために、PL 測定で得られたピーク A とピーク B の積分強度の温度依存性も同図にそれぞれ白丸と白四角で示す。PL 信号強度は両ピーク共に、100 K 以上の温度領域で温度上昇と共に単調に減少した。

観測された実験結果をより詳細に議論するために、電子および正孔に関する全ての緩和過程を含むキャリア緩和過程モデルを考えた。interlayer 試料のキャリア緩和過程モデルの概略図を図 5 に示す。interlayer 試料では e2 準位がミニバンド化しているため、e2 ミニバンドに励起された電子が e2 ミニバンド内をトンネル輸送される過程も考慮する必要がある。従って、e1 準位に光励起された電子に関して、発光再結合により電子が消失する過程 (Radiative recombination: RA 過程)、非発光再結合により電子が消失過程 (Non-Radiative recombination: NR 過程)、階段状井戸型ポテンシャル外へ電子が直接熱脱出する過程 (Thermal Escape: TE 過程)、および e1 準位から e2 ミニバンドに熱励起後、同ミニバンド内をトンネリング輸送して量子井戸外へ電子が到達する過程 (Tunneling after Thermal Excitation :TATE 過程)の 4 つの緩和過程を考慮した。ここで、NR、TE、TATE 過程の活性化エネルギーはそれぞれ、 $\Delta E_{nr}$ 、 $\Delta E_{te}$ 、 $\Delta E_{tate}$  で定義する。一方、正孔では、lh1 準位がミニバンド化しているため、hh1 準位に励起された正孔が lh1 準位へ熱励起した後に lh1 ミニバンドをトンネル輸送して量子井戸外へ到達する過程も考慮する必要がある。よって hh1 準位に励起された正孔に関して、RA、NR、TE および hh1 準位から lh1 準位へ熱励起後 lh1 ミニバンド内をトンネリングする過程 (TATE 過程) を考慮した。

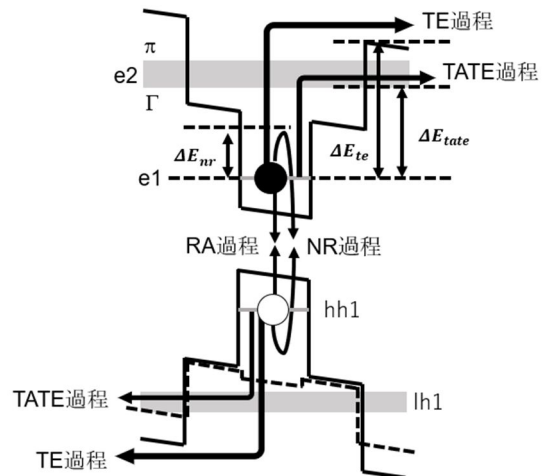


図 5 interlayer 試料のキャリア緩和過程モデル

PL と PPT 信号は、これらの緩和過程のうちそれぞれ RA 過程に伴う光子(光)放出と NR 過程に伴うフォノン(熱)放出を検出する。それぞれの緩和過程の温度依存性を考慮した緩和モ

デルから PL および PPT 信号強度の温度依存性を算出する式を構築し、実験値にフィッティングを行った。図 4 の実線および破線で示すように、構築したキャリア緩和過程モデルによって全ての実験結果をよく説明することができた。

フィッティングによって得られた活性化エネルギーより各緩和過程の起こりやすさを議論する。no-interlayer 試料では、電子が量子井戸外へ脱出するためには SL 領域終端の界面ポテンシャル障壁を熱的に超える必要があり、これは  $\Delta E_{te}$  に相当する。一方、interlayer 試料では、電子が  $e_2$  ミニバンド内をトンネリング輸送して SL 領域終端に到達すれば、容易に  $i$  型 GaAs 層へ移動できる。従って、 $\Delta E_{tate}$  が重要なパラメータになる。no-interlayer 試料の電子の  $\Delta E_{te}$  は 249 meV で、interlayer 試料の電子の  $\Delta E_{tate}$  の 154 meV よりも大きかった。正孔については、両試料で  $1h_1$  ミニバンドが形成されているため、正孔が量子井戸外へ脱出する際に重要になるパラメータは  $\Delta E_{tate}$  である。no-interlayer 試料の数値 (106 meV) よりも interlayer 試料の数値 (67 meV) の方が小さかった。さらに、両試料の  $\Delta E_{nr}$  を比較したところ、電子は同じ値であったが、正孔の値は interlayer 試料の方が大きいことが分かった。これは、interlayer 試料では非発光再結合を起こすためのエネルギーが大きく、同過程の発生頻度が低いことを表している。以上の結果より GaAs 歪緩和層を挿入することによって、量子井戸外へキャリアが脱出するための活性化エネルギーが小さくなり、更には非発光再結合損失を抑制できることで、量子井戸内に形成された光励起キャリアを効率よく外部へ取り出せることが実験的に明らかになった。

(2) 図 6 に、実験で得られた表面変位量の時間変化を示す。励起 LD 照射と同時に変位量が急激に増加し、照射終了と同時に減少した。また、高  $f_{ex}$  になるにつれて変位量が減少した。これは  $f_{ex}$  が増加すると、熱拡散長 ( $\mu_i$ ) が  $f_{ex}$  に反比例して減少するためである。図には理論計算結果も実線で示した。図から明らかのように、実験結果をよく再現することができた。ただし、 $f_{ex}$  が大きくなると、計算から得られた変位量最大値は、実験値の最大値よりも大きく算出された。また、LD 照射直後における変位量増加の割合も計算値の方が大きくなった。さらに計算結果では次の励起までに変位量が 0 まで戻らなかった。これらの違いは、理論計算において三次元的な熱膨張を考慮していない、発光再結合によるエネルギー損失を考慮していない、励起 LD 照射終了後の熱拡散過程を正確に再現できていない、といったことが原因と考えられる。よってポアソン比を考慮した計算や、Duty 比を変化させた実験を行うことで整合性を確認する必要があるが、非接触且つ非破壊的に非発光再結合による表面変位量を、サブナノメートルオーダーの好感度に検出できる手法を確立することができた。

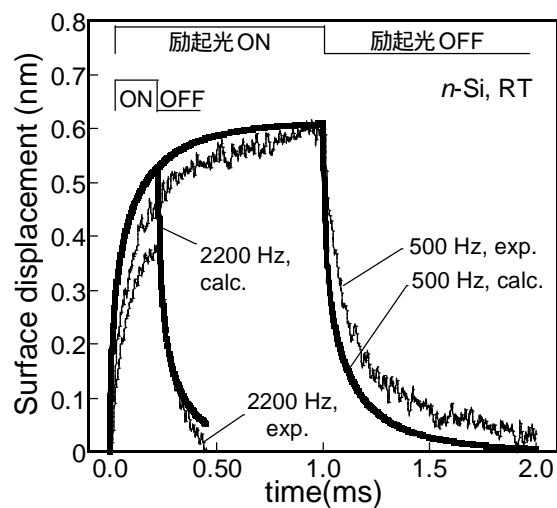


図 6 表面変位量の時間変化の実験値と理論値

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama	4. 巻 59
2. 論文標題 Decreasing of the thermal conductivity of Si nanopillar/SiGe composite films investigated by using a piezoelectric photothermal spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKA08-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab82a6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama	4. 巻 40
2. 論文標題 Analysis and Estimation of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film by Using Photo-Thermal Spectroscopy Measurement with a Multi-layer Model Calculation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	6. 最初と最後の頁 1P1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama	4. 巻 19
2. 論文標題 Significant Reduction of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film Fabricated by Neutral Beam Etching Investigated by a Piezoelectric Photothermal Measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th Int. Sympo. on Advanced Fluid Information	6. 最初と最後の頁 24-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Nakamura, A. Fukuyama, M. Sugiyama, T. Ikari	4. 巻 52
2. 論文標題 Effect of strain relaxation layer insertion on carrier recombination and escaping process in superlattice solar cell structures using photoluminescence spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 045104-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/aaeecd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama
2. 発表標題 Significant Reduction of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film Fabricated by Neutral Beam Etching Investigated by a Piezoelectric Photothermal Measurements
3. 学会等名 The 19th Int. Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Harada, T. Aki, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama
2. 発表標題 Analysis and Estimation of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film by Using Photo-Thermal Spectroscopy Measurement with a Multi-layer Model Calculation
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安良田裕基, 原田知季, 安藝 翼, 大堀大介, 寒川誠二, 碓哲雄, 福山敦彦
2. 発表標題 光熱変換信号の周波数依存性測定によるSiナノピラー/SiGe複合膜の熱伝導率解析
3. 学会等名 第11回半導体材料・デバイスフォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Fukuyama, S. Tategami, K. Takauchi, N. Matsuda, T. Nakamura, H. Suzuki, K. Nishioka, and T. Ikari
2. 発表標題 Effect of Light Irradiation on Carrier Mobility of n- and p-type Si substrates for Solar Cell Application
3. 学会等名 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高内健二郎, 松田真輝, 西岡賢祐, 碓哲雄, 福山敦彦
2. 発表標題 集光照射によるGaAsのHall移動度変化と太陽電池特性への影響
3. 学会等名 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (学振175シンポ)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 魯家男, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦
2. 発表標題 歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送メカニズム
3. 学会等名 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (学振175シンポ)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ikari, T. Nakamura, M. Sugiyama, A. Fukuyama
2. 発表標題 Verification of Stark-ladder formation in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell structures by a photo-reflectance
3. 学会等名 Int. Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Nakamura, T. Ikari, M. Sugiyama, A. Fukuyama
2. 発表標題 Role of GaAs interlayer between quantum well and barrier layers in carrier thermal escaping transport process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells
3. 学会等名 Int. Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 R. Iwanaga, T. Nakamura, J. Lu, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama
2. 発表標題 Temperature dependence of carrier relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell with GaAs interlayer
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム(EMS37)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高内健二郎, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦
2. 発表標題 光照射下のp-Si基板における光励起キャリア濃度の非線形的な増加とキャリアライフタイムの関係
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高内健二郎、碓哲雄、西岡賢祐、福山敦彦
2. 発表標題 集光照射下でのSi基板のHall移動度の温度依存性
3. 学会等名 第3回フロンティア太陽電池セミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ikari, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano and A. Fukuyama
2. 発表標題 Excitons in InGaAs/GaAsP multi quantum well and super lattice solar cell structures investigated by a photothermal spectroscopy
3. 学会等名 The European Materials Research Society Spring Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名	T. Nakamura, K. Matsuochi, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano and A. Fukuyama
2. 発表標題	Effect of barrier thickness on formation of miniband in InGaAs/GaAsP superlattice structure for solar cells application
3. 学会等名	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	魯家男, 武田秀明, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭, 福山敦彦
2. 発表標題	歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送評価
3. 学会等名	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	T. Nakamura, H. Takeda, J. Lu, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, and A. Fukuyama
2. 発表標題	Investigation of Carrier Thermal Excitation Process in GaAs-Inserted InGaAs/GaAsP Superlattice Solar Cell
3. 学会等名	第36回電子材料シンポジウム
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	H. Takeda, T. Nakamura, J. Lu, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, T. Ikari, A. Fukuyama
2. 発表標題	Investigation of carrier transport mechanism in superlattice Solar Cells with strain relaxation layer
3. 学会等名	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 中村 翼, 松落 高輝, 武田 秀明, Kasidit Toprasertpong, 杉山 正和, 中野 義昭, 鈴木 秀俊, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 フラットバンド構造内に挿入された超格子におけるミニバンド形成過程とキャリア輸送評価
3. 学会等名 2016年度レーザー・量子エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 碓 哲雄, 福山 敦彦, 中村 翼, 杉山 正和, 中野 義昭
2. 発表標題 光熱変換法による InGaAs/GaAsP 超格子に形成されるミニバンド端エネルギーの測定
3. 学会等名 第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関