

令和 6 年 4 月 25 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04876

研究課題名（和文）非発光電子遷移損失からみた半導体量子構造太陽電池における量子井戸の優位性

研究課題名（英文）Predominance of quantum well structure for solar cell application from a non-radiative electron transition loss point of view

研究代表者

碓 哲雄（IKARI, TETSUO）

宮崎大学・工学部・研究員

研究者番号：70113214

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高い光電変換効率を持つ半導体量子構造太陽電池においてどのようなナノ構造が今後の研究対象として優位であるかについて、非発光電子遷移の観点から実験および理論計算で議論した。研究は三つの方面から行った。液滴エピタキシ法で作製したAlGaAs量子ドット、歪み緩和層を挿入したInGaAs/GaAsP、そして、量子細線と同じような構造を持つWoW型InGaAs/GaAsP構造である。これらに対し、光励起キャリアの緩和過程を理論計算も加味して解明し、構造を精密に作製できる量子井戸作製から出発し変調した構造を用いることで、ナノ構造太陽電池デバイスの高効率かつ安定なものを作製できる指針を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子井戸や量子ドットをもつ半導体量子構造太陽電池が精力的に研究されているが、依然としてどの構造が将来的に有用であるかの結論に至っていない。そこでナノ構造のなかで量子井戸を基本とする構造が優位であることを示し、我が国の研究力のある方向へ集中させ、進展がより進めばと考えた。実験は量子井戸、量子細線、量子ドット型のナノ構造太陽電池に対して行い、良質のナノ構造が作れる量子井戸をベースとして、1次元、ゼロ次元の変調をかけて高効率化因子を導入することが必要であると結論づけた。これが、本研究課題において得られた最大の成果であり、量子構造太陽電池の開発に携わる研究者に指針を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：We discussed experimentally which nanostructures among quantum wells, quantum wires, and quantum dots are the most promising targets for future research in semiconductor quantum structure solar cells with high photovoltaic conversion efficiency. The research was mainly conducted for three structures. They are AlGaAs quantum dots fabricated by droplet epitaxy, InGaAs/GaAsP with strain-relaxation layers inserted, and WoW-type InGaAs/GaAsP structures. The WoW structure is similar to quantum wires. We have analyzed the relaxation process of photo-excited carriers and have shown a guideline for fabricating highly efficient and stable nanostructured solar cell devices by starting from a quantum well structure. The structure can be precisely fabricated and easily modulated for devices with higher conversion efficiency.

研究分野：半導体光物性

キーワード：量子井戸 量子ドット 太陽電池基礎 光物性

## 1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジーの発展によって量子構造を持つデバイスを精度良く作製できるようになり、太陽電池の光吸収層内に多重量子井戸や量子ドットを埋め込んで光電変換効率を改善させることが可能となった。さらに、二光子吸収、中間バンド構造やシュタルクラダー間の遷移などを活用することで、より高い変換効率をもつデバイス作製の試みも始まっている。しかしこの様なキャリア伝導機構の中で、光励起キャリアがフォノンを放出し熱となって再結合する非発光再結合成分は、太陽電池デバイスの効率を大きく低下させる主たる原因でありそのメカニズムを解明することが急務であるが、まだこれを直接測定することができず、光吸収や発光などの実験により相補的かつ間接的に測定しているのが現状である。

光励起キャリアのドリフト効果を除いた局所的緩和は、発光遷移(RT; Radiative transition)と非発光遷移(NRT; Non-radiative transition)の二つであるが、これまでは後者の非発光成分を直接測定することができなかった。我々は新しい実験手法である光熱変換分光法 (Piezoelectric Photothermal Spectroscopy: PPTS 法)によって非発光遷移を熱として検出する手法を考案し、デバイスの効率を大きく低下させるメカニズムを解明することとした。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、従来の太陽電池の特性評価実験手法に非発光遷移を測定できる実験手法を加えることで、量子井戸超格子構造などにおける光生成キャリアの再結合過程を系統的に解明し、太陽電池構造パラメーターの最適化を図る。

研究代表者は PPTS 法を開発し、バルク化合物半導体ばかりでなく、量子井戸、超格子、量子ドットなどに対して適用して多くの知見を得てきた。更に、従前の吸光度、量子効率(QE)、フォトルミネセンス(PL)、フォトリフレクタンス(PR)の実験手法も整備してその解析手法も格段に進歩させてきており、これらをうまく使い分けることによって、太陽電池中の「発光損失」と「非発光損失(熱)」を区別して測定する事ができるようになった。また、従来「開放端電圧」として測定されていたものを表面界面光起電力(SIPV\*)のスペクトル測定を行って回路開放時の光生成キャリアの再分布を測定できる。これらの実験手法は何れも電極形成を必要としないため簡便な測定手法である。これらにより、キャリアの全ての緩和過程を系統的かつ包括的に調べることができる。

## 3. 研究の方法

- 1) 量子井戸超格子、量子細線、量子ドット試料を作製する。このとき、量子構造の形状、密度を系統的に変化させるが、東京大学杉山教授、東北大学寒川教授、NIMS 間野主任研究員などから受けたノウハウを活用して試料を作製、あるいは作製を依頼する。
- 2) PPTS を含めた包括的光学測定(PR, PL, SIPV, QE, 光吸収)を室温以下 4K 程度までの範囲で実施する。上に述べた実験プロセスの中で、温度に大きく依存するものは、SIPV, QE、そして PPTS である。非発光遷移を起こすためのポテンシャル障壁についての議論はその実験的検証が難しかったためこれまでは経験則でのみ取り扱われてきたが、本研究課題によってこの部分を明らかにできる。研究実施に必要な実験装置の改良、モデル計算を含む実験結果の解析については、宮崎大学福山教授と連携する。
- 3) 量子構造における電子準位間の共鳴状態は、吸収層内の電場によってそのエネルギーや遷移確率を変化させることができるため、測定試料に外部電場を印可しながら実験を繰り返しその影響を考察する。信号を電場の関数として測定したとき共鳴状態が明確に現れ、その前後の電場強度ではフォノンの吸収と放出が期待されるため、スペクトル形状にその変化が現れる。
- 4) キャリアの伝導や再結合メカニズムを、モデル計算によって解析する。本研究ではバンド構造計算ソフト Nextnano あるいは Comsol を用いて測定結果をシミュレーションし、モデルの改善を図る。
- 5) 以上の実験結果から、太陽電池吸収層に井戸、細線、ドットなどの量子構造を用いた場合のメリットと、制御しなければならない要素(量子構造の形状と密度、再現性)について具体的に考察し、量子構造太陽電池の設計指針を示す。また、これらの成果を国際会議などで公表する。特に、PPTS 手法に関する実験上のメリットと解決しなければならない問題点についても積極的に講演を行い、他研究者の意見も考慮して汎用性のある包括的実験手法として確立し公開する。

## 4. 研究成果

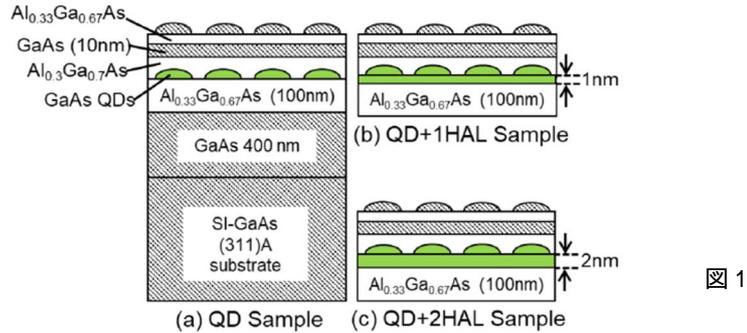
従来実施してきた本研究課題に係る実験手法の発展状況、すなわち光熱変換分光法(PPTS)を用いた光生成キャリアの非発光再結合過程の解析例は以下の通りである。これらを活用することで議論を大きく進展できた。

- (i) 井戸層厚さが 3nm と極めて薄い GaInNAs 単一量子井戸内の励起子を明確に分離し、変形(歪)ポテンシャルを実験的に算出

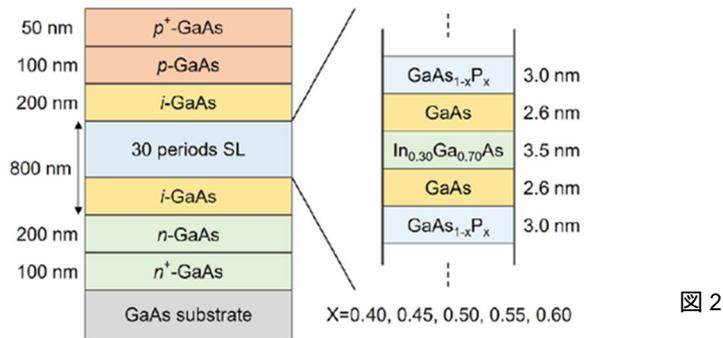
- (ii) GaInAs/GaAsP 歪み緩和超格子中の高次量子準位間遷移を同定
- (iii) GaAs ナノディスクの量子準位間遷移の光学的測定とサイズの適切化

以上の基盤技術を駆使した本研究課題における主たる成果は以下の三つである。

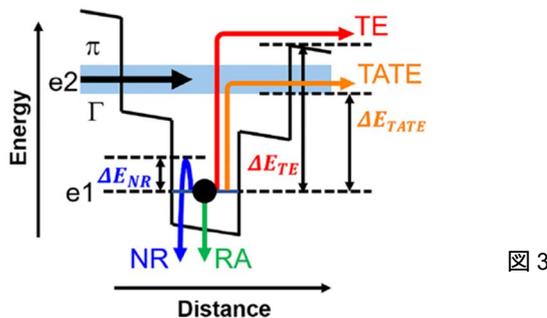
- 1) 液滴エピタキシ法で作製した良質の GaAs/AlGaAs 量子ドットについてはそのサイズに不均一性はあるものかなり高い効率を持つものが作製できるようになった。図 1 に我々が用いた試料の構造を示す。実験は主に PL で測定を行い、特に温度依存性を詳しく調べた。そこで新たに見いだしたバンド間遷移エネルギーの異常な温度依存性については、ドットのサイズのばらつきと同時に AlGaAs 障壁層の役割が重要であると考え、キャリアのやり取りを考慮した理論計算モデルで深く説明する事ができた。この場合障壁層は量子井戸構造であるため、高い変換効率を実現するには、ドットの形状の制御とともに量子井戸の存在が重要であることを示すことができた。



- 2) 量子井戸構造をもつものについては、デバイスを作製するうえで極めて高い精度でのサイズの制御が可能であることから量子ドットに比べてその優位性が期待される事は既に述べた。量子井戸(超格子)InGaAs/GaAsP は、構造上で高い効率を持つものとして研究してきたが、格子整合を図



るために導入した GaAs 歪み緩和層の役割を十分に理解する必要性がでてきた。図 2 にその構造とともに、光励起され井戸内に蓄積した電子が緩和されていく過程を模式的に示した(図 3)。実験結果を解析するため障壁層の高さをパラメーターとして変化させ、井戸の構造とキャリアの輸送特性の関係を明確にすることにした。障壁層の高さはP組成を変化させることで変えることができるため、In 組成を 0.3 と一定にした上で、P 組成を 0.4 から 0.6 まで変化させた試料を用意した。生



じる光励起キャリアの輸送特性は、発光再結合(図に示した RA)、非発光再結合(NR)、トンネルによるキャリアの輸送(TATE)、熱励起によるキャリアの輸送(TE)の四つのプロセスを含むレート方程式を立て実験結果を解析した。その結果、歪み緩和層の挿入で期待できる長距離にわたる平均歪みが局所歪みによって十分に緩和できなくなり、P(リン)のある決められた組成で効率が最高になることを見いだした。このように、誘導された内部歪みの影響をきちんとキャリアの輸送特性に取り入れ解析を行ったことは、直接測定が難しいとされる非発光プロセスを理解する実験手法としても有用であることを示すことができた。

- 3) 井戸とドットの間接構造と考えられる量子細線(ワイア)についても研究を行い、当初の目的を達成するための違う観点から実験を行った。量子細線といえども現時点ではそのサイズを厳密に意図して制御することは量子ドットの場合と同様まだ不完全である。このため、構造が安定に作製できる量子井戸から出発して変調を行い構造を作製することとした。具体的には、膜成長の際に基板を6度傾けて成長し、歪みの作用で三角形になった量子井戸超格子を作製できた。模式図を図4に示す。三角形の構造が得られ、この構造では紙面垂直方向に量子細線と同じような構造を部分的に持つようになる。量子井戸と量子細線の二つの構造を持つデバイスを作製でき、WoW(Wire on Well structure)構造と呼んだ。これについては光励起キャリアの再結合確率が減り、変換効率が增加することを示す

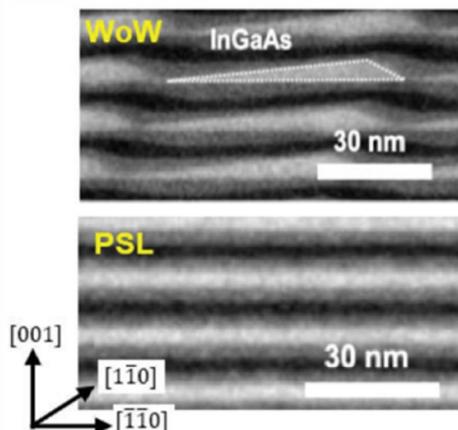


図 4

以上のように、高い変換効率が期待できるがデバイスのサイズなどの構造精度が不完全な構造を、構造を精密に作製できる量子井戸作製から出発し変調を加えた構造を用いることで、ナノ構造太陽電池デバイスの高効率かつ安定なものを作製できる指針を示すことができた。つまり、良質のナノ構造が作れる量子井戸をベースとして、1次元、ゼロ次元の変調をかけて高効率化因子を導入することが必要であると結論づけた。これが、本研究課題において得られた最大の成果である。なお、これらの成果を、国内外の学会で公表し議論を深めることで量子構造太陽電池の開発に携わる研究者に指針を示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13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 Komaba Shintaro, Taketa Nana, Asami Meita, Sugiyama Masakazu, Ikari Tetsuo, Fukuyama Atsuhiko	4. 巻 135
2. 論文標題 Enhancement of photoexcited carrier lifetime in an InGaAs/GaAsP wire-on-well quantum structure investigated by excitation-power-dependent photoluminescence measurements	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 153103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0176339	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 Asami Meita, Kampwerth Henner, Pollard Michael, Hao Xiaojing, Komaba Shintaro, Ikari Tetsuo, Fukuyama Atsuhiko, Watanabe Kentaroh, Nakano Yoshiaki, Sugiyama Masakazu	4. 巻 A2023
2. 論文標題 Refining Photothermal Deflection Spectroscopy: Incorporating Reflectance for Enhanced Accuracy in Light Absorption Measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 2300585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202300585	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 Harada Tomoki, Ohori Daisuke, Endo Kazuhiko, Samukawa Seiji, Ikari Tetsuo, Fukuyama Atsuhiko	4. 巻 133
2. 論文標題 Lifetime of photoexcited carriers in space-controlled Si nanopillar/SiGe composite films investigated by a laser heterodyne photothermal displacement method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 125703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0146578	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 Atsuhiko Fukuyama, Naoki Yamamoto, Ryo Furukawa, Masakazu Sugiyama and Tetsuo Ikari1	4. 巻 56
2. 論文標題 Photothermal investigation for optimizing a lattice strain relaxation condition of InGaAs/GaAsP superlattice photovoltaic structures from a nonradiative transition point of view	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Phys. D: Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 45101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/aca210	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 Tomoki Harada, Tetsuo Ikari and Atsuhiko Fukuyama	4. 巻 131
2. 論文標題 Development of laser heterodyne photothermal displacement method for mapping carrier nonradiative recombination centers in semiconductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 195701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0085041	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 Watanabe, A., Ikari, T., Furukawa, R., Sugiyama, M., Fukuyama, A.	4. 巻 128
2. 論文標題 Reduction of non-radiative recombination by inserting a GaAs strain-relaxation interlayer in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells investigated by photo-thermal spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 195702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031364	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 Miyachi, Y., Ikari, T., Mano, T., Noda, T., Fukuyama, A.	4. 巻 128
2. 論文標題 Effectiveness of AlGaAs barrier layers as a redistribution channel of photoexcited carriers on anomalous temperature dependence of photoluminescence properties of GaAs quantum dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 55701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0011571	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 Harada, T., Miyashita, N., Ikari, T., Fukuyama, A.	4. 巻 59
2. 論文標題 Effect of concentrated sunlight illumination on mobility and concentrator solar cell efficiency	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 71002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab9761	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 Tomoki Harada, Tsubasa Aki, Daisuke Ohori, Seiji Samukawa, Tetsuo Ikari, and Atsuhiko 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
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 Tsubasa Nakamura, Atsuhiko Fukuyama, Masakazu Sugiyama, and Tetsuo Ikari	4. 巻 58
2. 論文標題 Effects of barrier thickness on carrier non-radiative relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells by piezoelectric photothermal and surface photovoltage spectroscopies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 112001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab473d	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 Tsubasa Nakamura, Atsuhiko Fukuyama, Masakazu Sugiyama and Tetsuo Ikari	4. 巻 52
2. 論文標題 Effect of strain relaxation layer insertion on carrier recombination and escaping processes in superlattice solar cell structures using photoluminescence spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics D	6. 最初と最後の頁 45104
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 -

1. 著者名 Nakamura, T., Fukuyama, A., Sugiyama, M., and Ikari, T.	4. 巻 52
2. 論文標題 Effect of strain relaxation layer insertion on carrier recombination and escaping processes 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 45104
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 -

1. 著者名 Fukuyama, A., Tategami, S., Takauchi, K., Matsuda, N., Nakamura, T., Suzuki, H., Nishioka, K., Ikari, T.	4. 巻 1
2. 論文標題 Effect of Light Irradiation on Carrier Mobility of n- and p-type Si substrates for Solar Cell Application	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	6. 最初と最後の頁 1792-1795
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/PVSC.2018.8548267	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19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Tomoki Harada, K. Morita, S. Harada, H. Ohyama, T. Ikari, A. Fukuyama
2. 発表標題 Defect mapping of metal contaminated Si wafers by a laser heterodyne photothermal displacement method
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shintaro KOMABA, Naoki YAMAMOTO, Masakazu SUGIYAMA, Tetsuo IKARI and Atsuhiko FUKUYAMA
2. 発表標題 Optical characterization of wire-on-well structure by photoreflectance measurements
3. 学会等名 The 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田尚吾, 森田浩右, 大山博暉, 原田知季, 大窪純矢, 鈴木秀俊, 小倉暁雄, 今泉充, 碓 哲雄, 福山敦彦
2. 発表標題 転位すべり面に偏りのあるInGaAs太陽電池の非発光再結合マッピング評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢田部龍彦, 迫田理久, 荒井昌和, 碓哲雄, 福山敦彦
2. 発表標題 InAs/GaSb超格子のPL法とPR法を用いた遷移エネルギー評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本尚輝、駒場森太郎、杉山正和、碓哲雄、福山敦彦
2. 発表標題 InGaAs/GaAsP超格子太陽電池のキャリア輸送特性へ障壁層P組成変化による歪が及ぼす影響
3. 学会等名 第19回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川 諒, 碓 哲雄, 山本 尚輝, 杉山; 正和, 福山 敦彦
2. 発表標題 InGaAs/GaAsP 超格子構造において障壁層の P 組成変化がもたらす歪み補償と間接遷移バンドのキャリア輸送特性への影響
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学) 22p-D316-14
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田 知季, 安良田 裕基, 森田 浩右, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 重金属汚染させた Si の光ヘテロダイン光熱変位法による非発光再結合中心マッピング
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学) 22a-E105-2
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古川 諒, 渡部 愛理, 杉山 正和, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 PPT法による歪緩和層挿入超格子太陽電池におけるキャリア輸送特性へ正孔が与える影響
3. 学会等名 第81回秋季応用物理学会 10a-Z15-12
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮内 雄大, 川畑 公佑, 中村 泰樹, 間野 高明, 野田 武司, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 液滴エピタキシー成長GaAs量子ドットにおけるPLピーク位置温度依存性に対する非発光再結合の影響
3. 学会等名 第81回秋季応用物理学会 8p-Z10-6
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部 愛理, 古川 諒, 杉山 正和, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 フォトルミネッセンス分光法を用いた歪緩和層挿入超格子太陽電池における正孔輸送に関する解析
3. 学会等名 第81回秋季応用物理学会 10a-Z15-11
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田 知季, 安良田 裕基, 大堀 大介, 寒川 誠二, 碓 哲雄, 福山 敦彦
2. 発表標題 シリコンナノピラーの間隔変化による熱特性への影響
3. 学会等名 第81回秋季応用物理学会 8a-Z09-5
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoki Harada, Kenjiro Takauchi, Naoya Miyashita, Tetsuo Ikari, and Atsuhiko Fukuyama
2. 発表標題 Effect of strong sunlight illumination on Hall mobility in solar cell materials for concentrated multi-junction solar cells
3. 学会等名 EMRS 2019 Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Nakamura, Ryohei Iwanaga, Tsubasa Aki, Airi Watanabe, Tetsuo Ikari, Masakazu Sugiyama, and Atsuhiko Fukuyama
2. 発表標題 Role of strain relaxation layer on carrier recombination and escaping lifetimes in superlattice solar cell structures
3. 学会等名 EMRS 2019 Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Ohori, Takuya Goda, Tsubasa Nakamura, Tetsuo Ikari, Seiji Samukawa, and Atsuhiko Fukuyama
2. 発表標題 Significant Reduction of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film Fabricated by Neutral Beam Etching
3. 学会等名 EMRS 2019 Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuhei Ezo, Yudai Miyauchi, Tetsuo Ikari, Takaaki Mano and Atsuhiko Fukuyama
2. 発表標題 Role of wetting layer on the anomalous temperature dependence of the photoluminescence peak energies of GaAs quantum dots.
3. 学会等名 EMRS 2019 Spring Meeting (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, 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 International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubasa Nakamura, Tetsuo Ikari, Masakazu Sugiyama, and Atsuhiko 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 International conference on the physics of semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuo Ikari, Tsubasa Nakamura, Masakazu Sugiyama, and Atsuhiko Fukuyama
2. 発表標題 Verification of Stark-ladder formation in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell structure by a photo-reflectance measurements
3. 学会等名 International conference on the physics of semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Matsuda, T. Nakamura, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama
2. 発表標題 Optical properties of Si nanopillar /Si <sub>0.7</sub> Ge <sub>0.3</sub> composite film fabricated by using a neutral beam etching technique
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------