

平成28年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

平成28年4月22日現在

| | | | |
|---------------------------|--|---------------------------------------|------------------|
| 研究代表者 氏名 | 福井 孝志 | 所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時) | 北海道大学・情報科学研究科・教授 |
| 研究課題名 | 有機金属気相選択成長法による半導体ナノワイヤエレクトロニクスの創成 | | |
| 課題番号 | 18002003 | | |
| 研究組織 (研究期間終了時) | 研究代表者 福井 孝志（北海道大学・情報科学研究科・教授） 研究分担者 雨宮 好仁（北海道大学・大学院・情報科学研究科・教授） 本久 順一（北海道大学・大学院・情報科学研究科・教授） 葛西 誠也（北海道大学・大学院・情報科学研究科・准教授） 原 真二郎（北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・准教授） | | |

【補助金交付額】

| 年度 | 直接経費 |
|--------|------------|
| 平成18年度 | 98,100 千円 |
| 平成19年度 | 126,100 千円 |
| 平成20年度 | 117,800 千円 |
| 平成21年度 | 33,700 千円 |
| 平成22年度 | 35,400 千円 |
| 総計 | 411,100 千円 |

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

期間終了後も半導体ナノワイヤの研究を中心にさらに発展させてきた。主要な研究課題は、1) 結晶成長、2) 電子デバイス応用、3) 発光素子応用、4) ナノワイヤ太陽電池の四点である。

- 1) 結晶成長では、ナノワイヤの結晶構造とその構造安定性に関して大きな進展を見た。InP ナノワイヤにおいて成長条件によって立方晶（閃亜鉛鉱構造）から六方晶（ウルツ鉱構造）に遷移するが、その中間領域をダイナミカルに捉え、機構を解明した。

ナノワイヤ形成時にドーピングガスを導入し、その伝導形制御を行うが、特にナノワイヤ太陽電池のキャップ層には電極抵抗低減のため高濃度が必要であり、既に用いているシランガスの他に、n+ドーピングガスとしてテトラエチル錫(TESn)を導入した。GaAs, InP のプレーナ層での実験では、最大 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ と高濃度の n⁺型層が得られることが明らかとなった。

ナノワイヤの材料としての特性を生かして、汎用のデバイスを作るためには、液晶ディスプレイのようなガラス基板上に作製可能か検討の必要がある。その予備段階として、SiO₂ 上にスパッタ法で堆積したポリシリコンを基板としてその上に高密度の GaAs ナノワイヤを作製した。成長条件の最適化は今後の課題であるが、低コスト LED 作製のための新技術として注目され” NanotechWeb” 上で紹介された。

基板材料の検討に関する新しい試みとして、単層グラフェンを基板として用いた。グラフェンは、すでに数十インチという大面積での合成が報告され、基板として導電性が取れるため透明電極にもなり、またフレキシブルデバイスにも応用可能である。GaAs, InP, InAs など様々な材料でグラフェン上への結晶成長を試みたが、InAs(111)A 面が、偶然グラフェンのハニカム格子と周期が一致するため、ナノワイヤ及びナノ結晶という2つのモードでの成長が得られた。単層グラフェンはテキサス大の協力による。また InAs/グラフェン界面の高解像度電子顕微鏡写真と、共同研究を進める韓国ポステックの第一原理計算から、結晶成長初期の核形成の原理が van der Waals 力であることを明らかにした。更に選択成長法により、結晶成長空間を限定することで、主に InAs ナノワイヤが成長することを見出した。

- 2) 電子デバイス応用に関する新展開として、特別推進研究において進めてきたシリコン基板上の III-V 族ナノワイヤ成長の研究は、縦型ナノワイヤトランジスタでも非常に優れた特性が得られるようになった。多層シェル構造の設計に対し高解像度電子顕微鏡観察の結果は、設計通りの構造が得られていることを示しており、変調ドープも成功し、シリコン上に高移動度を持つ InGaAs チャネルの縦型トランジスタが作製できた。結果は、Nature に採択され、Beyond CMOS へのナノワイヤトランジスタの持つ可能性を示すことができた。

さらに、電子デバイスにおける低消費電力化は緊急の課題であり、一方従来型のトランジスタモードでは、動作に伴う一定の消費電力(60mV/dic)は原理的に避けられない。この難題を打ち破るために、シリコン上の InAs ナノワイヤを用いて、InAs/Si 界面に生じるバンド不連続を介したトンネル FET を作製した。シリコン基板と InAs ナノワイヤ間には、格子不整合に伴うミスフィット転位が存在し、これがヘテロ接合間でのリーク電流になっていたが、ナノワイヤ径を小さくしていきリーク電流低減を図った。最終的に InAs ナノワイヤ系を 30nm まで小さくすることで、優れた特性をもつトンネル FET が作製できた。そのドレイン電流—ゲート電圧特性は 21mV/dec と通常モードのトランジスタの理論限界 60mV/dic を大幅に下回る世界最高特性のトランジスタが作製された。さらにチャンネル部分のドーピングを n 型から p 型まで変えることができ、ノーマリーオンとノーマリーオフの両タイプのトランジスタが出来たことで、今後の集積化、回路化にも道筋を開いた。

- 3) グリーンギャップを埋める新しい緑色発光材料として、ウルツ鉱型構造を持つ GaP が注目されている。本来間接遷移の閃亜鉛型 GaP が、結晶構造を変えると直接遷移に変わることが理論計算から示されている。そこで完全なウルツ鉱構造が得られている InP ナノワイヤ側面に結晶構造を転写させることによりウルツ鉱構造の AlGaP シェル層を作製した。現在まで WZ 鉱構造を持つ InP/AlGaP コアシェルナノワイヤのカソードルミネセンスから、緑色発光(約 2.3eV)が得られている。

- 4) InP および GaAs コア-シェル構造ナノワイヤアレイを形成後にワイヤの間隙を透明有機膜(BCB)で埋め上部 n 側を透明電極(ITO)、裏面に p 電極を持つコア-シェル太陽電池を作製しその高効率化を進めた。まずナノワイヤ表面における電子-正孔の再結合を減らす目的でウィンドウ層となるワイドギャップの AlInP 層を最終表面に成長することでパッシベーション効果を調べた。バンドラインアップが、表面側へ拡散してくる正孔に対してのみブロック層となる結果により、太陽電池の変換効率は、6.35%まで向上した。

さらに、p-InP ナノワイヤに ITO を直接つけた簡便な構造を試みた。ITO が透明電極としてのみならず、p 型のワイドバンドギャップ半導体の役割も担うため、高効率の太陽電池が得られた。エネルギー変換効率は、7.37%に向上し、量子効率も短波長側では、プレーナ型 InP 太陽電池よりも優れた値が得られた。

ナノワイヤ太陽電池の低コスト化、省資源化への取り組みも進めた。ナノワイヤ部分の基板からの剥離方法を確立するとともに、再成長条件を明らかにすることにより基板の再利用が可能となっている。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

I. 査読付き論文 24 編（以下に代表的なものを掲載）

1. M. Yoshimura, E. Nakai, K. Tomioka, and T. Fukui, "Indium Tin Oxide and Indium Phosphide heterojunction nanowire array solar cells", Applied Physics Letters Vol.103, 243111-1-3(2013). IF: 3.794
2. K. Tomioka, M. Yoshimura, T. Fukui, "Sub 60 mV/decade switch using InAs Nanowire-Si heterojunction and turn-on voltage shift with pulsed doping technique", Nano Letters Vol.13, 5822-5826(2013). IF: 13.035
3. Y. J. Hong, J.W. Yang, W. H. Lee, R. S. Ruoff, K. S. Kim, T. Fukui, "van der Waals Epitaxial Double Heterostructure: InAs/Single-Layer Graphene/InAs", Advanced Materials Vol.25, 6847-6853(2013). IF:14.829
4. K. Ikejiri, F. Ishizaka, K. Tomioka, and T. Fukui, "GaAs nanowire growth on polycrystalline silicon thin films using selective-area MOVPE", Nanotechnology Vol.24 115304 (6pp) (2013). IF:3.842
5. K. Ikejiri, H. Ishizaka, K. Tomioka, T. Fukui, "Bi-directional Growth of Indium Phosphide Nanowires", Nano Letters Vol.12, pp.4770-4774 (2012). IF:13.025
6. K. Tomioka, M. Yoshimura, T. Fukui, "A III-V nanowire channel on Si for high-performance vertical transistors", Nature Vol.488, pp.189-192 (2012). IF:38.597
7. Sasakura, H.; Hermannstaedter, C.; Dorenbos, S. N.; Akopian, N.; van Kouwen, M. P.; Motohisa, J.; Kobayashi, Y.; Kumano, H.; Kondo, K.; Tomioka, K.; Fukui, T.; Suemune, I.; Zwiller, V., "Longitudinal and transverse exciton-spin relaxation in a single InAsP quantum dot embedded inside a standing InP nanowire using photoluminescence spectroscopy", PHYSICAL REVIEW B, Vol. 85, 075324 (2012). IF:3.767
8. Y. J. Hong, W. H. Lee, Y. Wu, R. S. Ruoff, and T. Fukui, "van der Waals Epitaxy of InAs Nanowires Vertically Aligned on Single-Layer Graphene", Nano Letters Vol.12, pp.1431-1436 (2012) IF:13.025
9. K. Ikejiri, Y. Kitauchi, K. Tomioka, J. Motohisa, and T. Fukui, "Zinc Blende and Wurtzite Crystal Phase Mixing and Transition in Indium Phosphide Nanowires", Nano Letters Vol. 11, pp. 4314-4318 (2011). IF:13.025
10. Y.-J. Hong and T. Fukui: "Controlled van der Waals Heteroepitaxy of InAs Nanowires on Carbon Honeycomb Lattices," ACS NANO, Vol. 5, pp. 7576-7584 (2011). IF:12.062

II. 招待論文 1 編

富岡 克広、福井 孝志、「半導体ナノワイヤデバイスの新展開—縦型トランジスタ応用—」、電子情報通信学会論文誌 C Vol. J96-C, pp. 221-230 (2013).

III. 著書 1 冊

福井孝志、ハンドブック「ナノワイヤ最新技術の基礎と応用展開」（監修：福井孝志）シーエムシー出版 2013年2月

IV. 解説記事 2 編

1. 富岡 克広、福井 孝志、「半導体ナノワイヤデバイス応用の新展開」、応用物理 第81巻、第1号、pp. 59-64 (2012).
2. 福井孝志、ナノワイヤの発光素子応用、研究開発リーダー Vol.10. 11-15(2013)

V. 国際会議招待講演 24 件（以下に代表的なものを掲載）

1. Takashi Fukui, Masatoshi Yoshimura, and Katsuhiko Tomioka: "Semiconductor nanowires and their photovoltaic applications (invited)," JSPS-RSAS Joint Conference on Capturing the Sun, Stockholm, Sweden, May 30 - 31 (2011).
2. Takashi Fukui, Keitaro Ikejiri, Masatoshi Yoshimura, Eiji Nakai and Katsuhiko Tomioka: "Compound Semiconductor Nanowire Solar Cells (Invited)," the 1st International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN), Brisbane, Australia, Oct. 22- 25 (2012).
3. Takashi Fukui, Masatoshi Yoshimura, Eiji Nakai and Katsuhiko Tomioka: "III-V Compound Semiconductor Nanowire Solar Cells (Invited)," 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CREO:2013), San Jose, USA, June 9-14 (2013).
4. Takashi Fukui, Masatoshi Yoshimura, Eiji Nakai and Katsuhiko Tomioka: "III-V Compound Semiconductor Nanowire Solar Cells (Invited)," TMU-IAS Focus Workshop, Munich, Germany, October 28-29(2013)
5. Takashi Fukui, Masatoshi Yoshimura, Eiji Nakai Fumiya Ishizaka and Katsuhiko Tomioka: "Selective area growth of III-V semiconductor nanowires and their photovoltaic and electron device applications (Invited)," Nanowires 2013, Rehovot, Israel, November 12-15(2013)

VI. 産業財産権 9 件（以下に代表的なものを掲載）

1. アメリカ特許出願 出願番号: 13/124.493 出願日 2011/4/15 発明の名称:「半導体発光素子アレー、およびその製造方法」発明者:比留間 健之, 原 真二郎, 本久 順一, 福井 孝志.
2. ヨーロッパ特許出願 出願番号: 08877389.0 出願日 2011/5/13 発明の名称:「半導体発光素子アレー、およびその製造方法」発明者:比留間 健之, 原 真二郎, 本久 順一, 福井 孝志.

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

- 1) 科学研究費助成事業（基盤研究（S））（2011年度～2015年度） 経費総計：163,200,000円
“化合物半導体ナノワイヤによる光デバイス応用”
- 2) 民間との共同研究（本田技術研究所）（2011年度～2012年度） 経費総計：21,735,000円
“化合物半導体格子不整合ヘテロ構造ナノワイヤの成長”
- 3) 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（共同研究：さきがけ専任研究員富岡克広）（2012年度～2014年度）
経費総計：31,546,000円
“新しい半導体固相界面による新規グリーンデバイスの開発”

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

1) 結晶成長

- ・基板上にナノワイヤの縦方向に成長した後、横方向成長で側面を覆うコア-シェル構造成長技術では、発光素子応用で GaInP 系のワイドギャップ半導体、更に InP 太陽電池に関しては、シェル層としてパッシベーションに用いる AlInP など、多様な材料系でのコア-シェル構造の応用が進んだ。
- ・基板材料も、従来の化合物半導体結晶とシリコン以外にも、ポリシリコン基板と単層グラフェンを試みた。グラフェン上では、InAs (111)A 面が、偶然グラフェンのハニカム格子と周期が一致するため、ナノワイヤ及びナノ結晶という 2 つのモードでの成長が得られた。さらに InAs/グラフェン界面の結晶成長初期の核形成の原理が van der Waals 力であることを明らかにした。

2) 電子デバイス応用に関する新展開

- ・シリコン基板上的 III-V 族ナノワイヤ成長では、デバイス作製技術が大きく進展し、縦型ナノワイヤトランジスタでも非常に優れた特性が得られるようになった。多層シェルでは、設計通りの構造が得られ、変調ドープも成功し、シリコン上に高移動度を持つ InGaAs チャネルの縦型トランジスタが作製できた。
- ・さらに InAs/Si 界面に生じるバンド不連続を介したトンネル FET を作製した。InAs ナノワイヤ系を 30nm まで小さくすることで、優れた特性をもつトンネル FET が作製でき、ドレイン電流-ゲート電圧特性は 21mV/dec と通常モードのトランジスタの理論限界 60mV/dec を大幅に下回る世界最高特性のトランジスタが作製された。

3) 発光素子応用

- ・グリーンギャップを埋める新しい緑色材料として、ウルツ鉱型構造を持つリン系半導体が注目されているが、ウルツ鉱型構造 InP ナノワイヤ側面にウルツ鉱型構造の AlGaP シェル層を作製しカソードルミネッセンスから、緑色発光（約 2.3eV）が得られた。

4) ナノワイヤ太陽電池

- ・ナノワイヤ表面に AlInP 層を成長することで、バンドラインアップが、表面側へ拡散してくる正孔に対してのみブロック層となる結果により、太陽電池の変換効率は、6.35%まで向上した。
- ・p-InP ナノワイヤに ITO を直接つけた簡便な構造を試みた。ITO が p 型のワイドバンドギャップ半導体の役割も担うため、エネルギー変換効率は、7.37%に向上し、量子効率も短波長側では、プレーナ型 InP 太陽電池よりも優れた値が得られた。
- ・高効率太陽電池を目指すために、タンデム型の GaAs 系多接合ナノワイヤ太陽電池の提案と構造設計を行った。タンデム構造の 2 層目に相当する InGaAs (1.2eV) の pn 縦接合太陽電池を、同様な AlInP パッシベーション層を導入して作製し、こちらは 5.34%が得られた。
- ・構造設計についても、既存の計算ソフトを活用し、まずはコア-シェル型太陽電池の動作特性のシミュレーションを行い、ナノワイヤの長さ、太さ、隣同士の間隔、セル構造作製前後での光反射・光吸収変化を計算と実験とで比較・解析しつつ、アレキ構造の最適化を進めた。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

- ・ 特推期間中の発表論文は計 47 件で、その内 100 回以上引用されている論文が 4 件あるなど、ナノワイヤの作製技術として、先駆的な選択成長法を用いた高均一のコアシェル構造に、世界から多くの注目を集め、結果として論文が世界中で多数回引用されることとなった。ただ、技術的な難しさもあり、アメリカでは選択成長法が多く取り入れられ始めているのと対照的に、オランダ、スウェーデンなどのヨーロッパでは、依然として簡便な金触媒によるナノワイヤ作製が主流である。
- ・ 特別推進研究終了後の研究による学術論文は 24 編である。論文の平均インパクトファクターが 6.935 と高く、この中には国際的に評価の高い (IF > 10) 学術誌 Nature(38.597)、Advanced Materials(14.829)、ACS Nano(12.062) 各 1 編と Nano Letters(13.025) 4 編の計 7 編が含まれる。これらの論文の合計被引用件数 (TC) は既に 497 回であり、世界の多くの研究者が我々の研究成果を参考にしている。
- ・ 特別推進研究終了後の国際会議の招待講演は 24 回で、米国 8 回、日本 7 回、スウェーデン、オーストラリア、韓国各 2 回、ドイツ、イスラエル、中国各 1 回と、研究成果のインパクトが世界中に普遍的に広がっていることを示している。
- ・ 国内では、電子情報通信学会和文論文誌 C 平成 25 年 9 月号掲載の富岡克広、福井孝志「半導体ナノワイヤデバイスの新展開—縦型トランジスタ応用—」が、エレクトロニクスソサエティ招待論文賞を受賞した。
- ・ 日本国内におけるこの分野の活動状況を取りまとめるため、国内の 25 名の研究者と協力して、2013 年ハンドブック「ナノワイヤ最新技術の基礎と応用展開」を出版した。(監修福井孝志)
- ・ 産業財産権の確保として、特許出願も積極的に進めており、外国出願も含めて 9 件出願した。
- ・ 半導体最先端材料デバイスの国際会議として、2015 年 9 月に札幌で、固体素子材料国際会議 (SSDM2015) を開催し、その組織委員長を務めた。国内外からの投稿件数 700 件、参加者約 900 名であった。

個別の研究項目に関しては以下に示す。

- ・ 結晶成長においては、当初基板として化合物半導体及びシリコンを計画していたが、将来的に実用的なデバイス作りのためには、より大量生産またはプロセスに適した新しい基板の検討が必要と考え、2 種類の基板でナノワイヤ成長を新たに試みた。①通常の液晶ディスプレイなどで使われるポリシリコンを基板とした GaAs ナノワイヤ成長を行いその成長条件を明らかにした。この論文は、低コスト LED 作製のための新技術として NanotechWeb で紹介された。②透明電極としても使える単層グラフェン上のナノワイヤ成長をテキサス大学の協力を得て進めた結果、van der Waals エピタキシという全く新しい結晶成長モードを見出すに至った。論文はいずれも国際的に評価の高い学術誌に掲載され、すでに 60 回を超える被引用件数にのぼる。国際会議の招待講演でも非常に注目された。
- ・ ナノワイヤの電子デバイスに関しては、特別推進研究終了後の 5 年間で目覚ましい進展を見せた。シリコン上の縦型ナノワイヤトランジスタの成果は、Nature に発表したが、すでに被引用回数 205 回に達しており、北海道大学からの関連するトンネルトランジスタに関するプレス発表では、日本経済新聞を始め 7 誌に掲載された。
- ・ 光デバイス応用では、当初のシリコン上の発光ダイオードに加えて、新たに「グリーンギャップ」を埋めるために、新緑色発光材料として結晶構造を人為的に閃亜鉛鉱からウルツ鉱に変えた AlGaP コアシェルナノワイヤを作製し、カソードルミネッセンスから緑色発光を確認し、窒化物に変わる材料として注目を集めている。
- ・ 2009 年にホンダ技術研究所との共同研究として発表した InP コアシェルナノワイヤ太陽電池は、効率は 3% であったが、ナノワイヤ太陽電池としての最初の報告であったため、その後 Lund 大、アイントフォーフェン工科大はじめ多くの研究機関が、同様な構造で太陽電池の作製を試みている。論文は既に世界中で、120 回以上引用されている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

| No | 論文名・著者名・発行年・ページ数等 | 日本語による簡潔な内容紹介 | 引用数 |
|----|--|---|-----|
| 1 | “Control of InAs Nanowire Growth Directions on Si”, Tomioka, Katsuhiko; Motohisa, Junichi; Hara, Shinjiroh; Fukui, Takashi, Nano Letters 8 (2008) 3475-3480, | シリコン基板上にInAsのナノワイヤを均一に成長させる方法を明らかにした。成長前の基板に熱処理を施しAsを最初に吸着させることで、成長方向を揃えることに成功した。 | 180 |
| 2 | “GaAs/AlGaAs Core Multishell Nanowire-Based Light-Emitting Diodes on Si”, Tomioka, Katsuhiko; Motohisa, Junichi; Hara, Shinjiroh; Hiruma, Kenji; Fukui, Takashi, Nano Letters 10 (2010) 1639-1644 | シリコン基板上にGaAs ナノワイヤを成長後、横方向にAlGaAs/GaAsの量子井戸構造を成長することで、シリコン上に初めて近赤外領域の発光ダイオードを作製することに成功した。 | 138 |
| 3 | “Growth of Core-Shell InP Nanowires for Photovoltaic Application by Selective-Area Metal Organic Vapor Phase Epitaxy”, Goto, Hajime; Nosaki, Katsutoshi; Tomioka, Katsuhiko; Hara, Shinjiroh; Hiruma Kenji; Motohisa, Junichi; Fukui, Takashi, Applied Physics Express 2 (2009) 035004 | 選択成長法により、InPのコアシェル構造のナノワイヤ太陽電池を作製した。効率は3%であるが、ナノワイヤ太陽電池の最初の報告となった。 | 124 |
| 4 | “Single GaAs/GaAsP Coaxial Core-Shell Nanowire Lasers” Hua, Bin; Motohisa, Junichi; Kobayashi, Yasunori; Hara, Shinjiroh; Takashi, Fukui, Nano Letters 9 (2009) 112-116 | 選択成長法により、GaAs/AlGaAs コアシェル構造のナノワイヤレーザを作製した。光励起ではあるが、ナノワイヤとして近赤外領域で初めてレーザ発振が得られた。 | 115 |
| 5 | “Mechanism of catalyst-free growth of GaAs nanowires by selective area MOVPE”, Ikejiri, Keitaro; Noborisaka, Junichi; Hara, Shinjiroh; Motohisa, Junichi; Fukui, Takashi, Journal of Crystal Growth 298 (2007) 616-619 | GaAsの選択成長において、その条件により成長方向が縦方向、および横方向に変わることを明らかにするとともに、この成長条件依存性を利用してコアシェル構造が作製できることを示した。 | 82 |
| 6 | “Selective-area growth of vertically aligned GaAs and GaAs/AlGaAs core-shell nanowires on Si (111) substrate”, Tomioka, Katsuhiko; Kobayashi, Yasunori; Motohisa, Junichi; Hara, Shinjiroh; Fukui, Takashi, Nanotechnology 20 (2009) 145302 | シリコン基板上にGaAs/AlGaAs ナノワイヤを成長する条件を明らかにした。シリコン上にAsを終端することで垂直方向のみの成長が得られた。 | 70 |
| 7 | “Growth of highly uniform InAs nanowire arrays by selective-area MOVPE”, Tomioka, K.; Mohan, P.; Noborisaka, Hara, S; J.; Motohisa, J; Fukui, T., Journal of Crystal Growth 298 (2007) 644-647 | 高均一のInAs ナノワイヤの選択成長条件を明らかにした。特に積層欠陥と成長温度などの成長パラメータの関係を克明に調べた。 | 68 |
| 8 | “Structural Transition in Indium Phosphide Nanowires”, Kitauchi, Yusuke; Kobayashi, Yasunori; Tomioka, Katsuhiko; Hara, Shinjiroh; Hiruma, Kenji; Fukui, Takashi; Motohisa, Junichi, Nano Letters 10 (2010) 1699-1703 | InP ナノワイヤ成長において、その条件によりセン亜鉛錳型とウルツ錳型に変わることを見出し、その構造相転移のメカニズムを明らかにした。 | 49 |
| 9 | “Vertical Surrounding Gate Transistors Using Single InAs Nanowires Grown on Si Substrates”, Tanaka, Tomotaka; Tomioka, Katsuhiko; Hara, Shinjiroh; Motohisa Junichi; Sano Eiichi; Fukui Takashi., Applied Physics Express 3 (2010) 025003 | シリコン基板上にInAs ナノワイヤを成長しその側面に絶縁膜を介してゲートをつけたトランジスタを作製し、その特性を調べた。自立型ナノワイヤトランジスタの最初の報告。 | 49 |
| 10 | “Growth characteristics of GaAs nanowires obtained by selective area metal-organic vapour-phase epitaxy”, Ikejiri, Keitaro; Sato, Takuya; Yoshida, Hiroatsu; Katsuhiko; Hiruma, Kenji; Motohisa, Junichi; Hara, Shinjiroh; Fukui, Takashi, Nanotechnology 19 (2008) 265604 | 触媒を用いずに選択成長法でナノワイヤ構造が得られる理由が、成長中に回転双晶が生じるためであることを明らかにした。サイズ、成長温度依存性も調べた。 | 46 |

【研究期間終了後に発表した論文】

| No | 論文名 | 日本語による簡潔な内容紹介 | 引用数 |
|----|---|--|-----|
| 1 | “A III-V nanowire channel on silicon for high-performance vertical transistors”, Tomioka, Katsuhiro; Yoshimura, Masatoshi; Fukui, Takashi, Nature 488 (2012) 189 | シリコン基板上に縦型のマルチコアシェルナノワイヤをベースとした変調ドープ構造のトランジスタを作製し、高い移動度と理論限界に近いサブスレッショルドスロープをもつ特性が得られた。III-V 族半導体ナノワイヤトランジスタをシリコン上に作製し優れた特性を示した画期的な成果。 | 205 |
| 2 | “III-V Nanowires on Si Substrate: Selective-Area Growth and Device Applications”, Tomioka, Katsuhiro; Tanaka, Tomotaka; Hara, Shinjiro; Hiruma, Kenji; Fukui, Takashi, Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 17 (2011) 1112-1129 | 無極性のシリコン基板上に III-V 族化合物のナノワイヤをいかに垂直に高均一で成長するか、さらにその後のプロセスでどのように縦型トランジスタを作製するか、またそのトランジスタ特性の評価を総合的に記した論文。 | 57 |
| 3 | “Zinc Blende and Wurtzite Crystal Phase Mixing and Transition in Indium Phosphide Nanowires”, Ikejiri, Keitaro; Kitauchi, Yusuke; Tomioka, Katsuhiro; Motohisa, Junichi; Fukui, Takashi, Nano Letters 11 (2011) 4314-4318 | InP ナノワイヤ結晶が、その成長条件のわずかな違いで、本来の立法晶セン亜鉛鉱から六方晶ウルツ鉱構造に変化する様子をその中間領域を含めて克明に調べそのメカニズムを明らかにした。 | 35 |
| 4 | “van der Waals Epitaxy of InAs Nanowires Vertically Aligned on Single-Layer Graphene”, Hong, Y. J.; Lee, W. H.; Wu, Y. P.; Ruoff, Rodney; Fukui, Takashi, Nano Letters 12 (2012) 1431-1436 | テキサス大ルオフ教授のグループから単層グラフェンの提供を受け、これを基板として InAs のナノワイヤを作製した。グラフェンのハニカム構造と InAs の格子位置が一致することからエピタキシャル成長であることを明らかにした。 | 29 |
| 5 | “Selective-area growth of III-V nanowires and their applications”, Tomioka, Katsuhiro; Ikejiri, Keitaro; Tanaka, Tomotaka; Motohisa, Junichi; Hara, Shinjiro; Hiruma, Kenji; Fukui, Takashi, Journal of Materials Research 26 (2011) 2127-2141 | 選択成長法による III-V 族半導体ナノワイヤの結晶成長とそのデバイス応用を詳細にまとめたレビュー論文。 | 21 |
| 6 | “Controlled van der Waals Heteroepitaxy of InAs Nanowires on Carbon Honeycomb Lattices”, Hong, Young Joon; Fukui, Takashi, Acs Nano 5 (2011) 7576-7584 | 多層グラフェン上に InAs を成長すると Van der Waals 力によりエピタキシャル成長すること、また接触面に当たる InAs(111)A面のハニカム構造とグラフェンのハニカム構造の周期が一致することを始めて明らかにした。 | 21 |
| 7 | “Sub 60 mV/decade Switch Using an InAs Nanowire-Si Heterojunction and Turn-on Voltage Shift with a Pulsed Doping Technique”, Tomioka, Katsuhiro; Yoshimura, Masatoshi; Fukui, Takashi, Nano Letters 13 (2013) 5822-5826 | シリコン基板と InAs ナノワイヤの間のできるバンド不連続を利用したトンネルトランジスタの論文。サブスレッショルドスロープが通常の拡散モードの限界値を超え、超低消費電力動作の可能性を示した。 | 18 |
| 8 | “Position-Controlled III-V Compound Semiconductor Nanowire Solar Cells by Selective-Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, Fukui, Takashi; Yoshimura, Masatoshi; Nakai, Eiji; Tomioka, Katsuhiro, Ambio 41 (2012) 119-124 | 選択成長法により位置と均一性を制御した III-V 族化合物半導体を用いた太陽電池の報告。コアシェル構造により光吸収と電子-正孔分離の方向を独自に制御できる、また太陽光反射を抑えることができるなどの多くの利点を有している。 | 17 |
| 9 | “Van der Waals Epitaxial Double Heterostructure: InAs/Single-Layer Graphene/InAs”, Hong, Young Joon; Yang, Jae Won; Lee, Wi Hyoung; Ruoff, Rodney S; Kim, Kwang S; Fukui, Takashi, Advanced Materials 25 (2013) 6847-6853 | グラフェン上の InAs ナノワイヤ成長の第3報目で、超高解像度の電子顕微鏡像と第一原理計算からファンデルワールスギャップを求め双方が一致することを示した。また単層グラフェンの両サイドにグラフェンを挟むように InAs ナノワイヤが成長することも電子顕微鏡像から明らかにした。 | 13 |
| 10 | “Indium Phosphide Core-Shell Nanowire Array Solar Cells with Lattice-Mismatched Window Layer”, Yoshimura, Masatoshi; Nakai, Eiji; Tomioka, Katsuhiro; Fukui Takashi, Applied Physics Express 6 (2013) 052301 | 選択成長法により位置と均一性を制御した III-V 族化合物半導体を用いた太陽電池の報告。コアシェル構造の外部シェルでの表面再結合を抑える工夫として、外部にバンドギャップの大きい薄いウインドウ層を設けることで、効率をあげることができた。 | 13 |

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

1. 特別推進研究終了後も半導体ナノワイヤの研究は世界中で進められており、発表論文数も増加の一途をたどっている。研究代表者が独自に開発した選択成長法は、制御性、均一性などの基本的な特性は明らかに他より優れており、世界を先導している。デバイス応用面での対抗勢力は、スウェーデン Lund 大、オランダ Eindhoven 工科大などであり、米国では最近ようやく、UCLA, UC バークレイなどが、我々と全く同じ方法で研究を開始している。一方 2000 年頃、この分野の先鞭をつけたハーバード大 Lieber のグループは最近ほとんど論文報告がない。
2. 日本国内におけるこの分野の活動状況として、国内の 25 名の研究者を取りまとめて、2013 年ハンドブック「ナノワイヤ最新技術の基礎と応用展開」を出版した。（監修福井孝志）
3. 投稿論文 24 編（うち 23 編が ISI に掲載された論文）は、合計 IF は 159.51 で、平均 IF は 6.935 である。この内国際的評価の高い学術誌 (IF > 10) への掲載論文は、Nature (38.597)、Advanced Materials (14.829)、ACS Nano (12.062) が各 1 編と Nano Letters (13.025) が 4 編の計 7 編である。主にこの分野で進んでいる欧米からの論文に引用されており、研究成果は世界から注目されている。
4. 国際会議の招待講演を 24 回行ったが、開催地の内訳は、米国 8 回、日本 7 回、スウェーデン、オーストラリア、韓国各 2 回、ドイツ、イスラエル、中国各 1 回と、日本ばかりでなく欧米、アジア、オーストラリアなどで開催された国際会議で注目されており、我々の研究成果のインパクトが世界中に普遍的に広がっていることを示している。特に、2012 年スウェーデン科学アカデミー主催の会議「Capturing the Sun」では、自然エネルギー関連の広範な講演が行われたが、会議の冒頭で「ナノワイヤ太陽電池」の招待講演を行った。2013 年のイスラエルのナノワイヤ国際会議ではプレナリー講演で、「選択成長ナノワイヤとそのデバイス応用」を紹介した。
5. 関連分野への波及性として、太陽電池はホンダ技術研究所、発光素子についてはシャープと共同研究を進めるとともに、特許も、国内、国際ともに積極的に出願した。

プレスリリース等、研究成果の社会・国民への発信

1. 北海道新聞、平成 23 年 10 月 14 日
ナノワイヤ太陽電池に関する研究紹介記事が朝刊の 1 面に掲載された。特に高効率エネルギー変換の可能性を秘めている点が注目された。
2. NanotechWeb (英国 IOP 出版社によるナノテク関連の最新技術の Web) 平成 25 年 4 月 16 日
ポリシリコン基板上にナノワイヤを作製した Nanotechnology の論文の紹介。低コスト LED 作製のための新技術として注目された。 <http://nanotechweb.org/cws/article/lab/53045>
3. Semiconductor Today (半導体関連の最先端技術の紹介 Web) 平成 26 年 1 月 7 日
InP ナノワイヤ太陽電池の特性を改善した Applied Physics Letters の論文の紹介。p 型 InP ナノワイヤに直接 IT0 を付けた太陽電池で、短波長側の量子効率が高い点が注目された。
http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/JAN/JST_070114.shtml
4. 北海道大学プレスリリース 平成 24 年 6 月 13 日
「トランジスタの理論限界を突破 次世代省エネデバイス実現へ」
http://www.hokudai.ac.jp/news/120613_pr_ist.pdf
新展開として進めていた、シリコン上のナノワイヤトランジスタの特性に関する発表を行った。ポストシリコン CMOS 技術として、非常に優れた特性を示している。なお、このプレスリリースを受けて、以下の 7 紙から、同日以降に関連記事が発表された。「毎日新聞」「日本経済新聞」「北海道新聞」「日本産業新聞」「日刊工業新聞」「電気新聞」「日経産業新聞」

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）

- 1) 研究分担者葛西誠也准教授：2014年7月に教授に昇進。平成25年度～平成29年度、新学術領域「分子アーキテクトニクス：単一分子の組織化と新機能創成」A04班班長および研究代表者を務め、半導体ナノワイヤ研究で培われたセンシング・情報処理デバイス技術をベースに化学とエレクトロニクスおよび情報科学を結びつける異分野融合研究を推進。
- 2) ポストク研究員(当時)富岡克広博士：2015年1月より北海道大学大学院情報科学研究科・助教。III-V族化合物半導体ナノワイヤの異種集積技術の確立とIII-V/Si接合界面による新規デバイス応用について研究、英国科学誌Nature [Nature 488, pp189 (2012), 526, pp. 51 (2015)]など多数論文報告を行う一方、科学技術振興機構さきがけ事業の二つの領域、科学研究費助成事業（若手研究（A））に採択されている。平成27年度文部科学大臣・若手科学者賞、他10件受賞。