

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20241033

研究課題名（和文） スピンチャンネルから量子ドットへのスピントロニクスとその量子ビットへの応用

研究課題名（英文） Spin blockade from spin channel to quantum dots and its application to qubit

研究代表者

陽 完治 (YOH KANJI)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：60220539

研究成果の概要（和文）：

インジウム砒素系化合物半導体と鉄電極界面における界面反応により生成される化合物がスピン注入効率をブロックしていることを界面の相図を調べることにより探索した。鉄系のスピン源を用いて観測されたスピントランジスタの電流振動が理論計算とよく一致していることを確認した。金コロイドを用いるインジウム砒素ナノワイヤの結晶成長の最適化を応用してナノワイヤスピントランジスタを作製し、スピン軌道相互作用に起因すると思われる電流変調を観測した。量子ドットを集積したスピントランジスタ構造の量子計算機デバイスにおいてスピン注入効率が最大40%（実績37%）のFe/InAs強磁性/半導体ハイブリッド系では、スピンチャンネル/量子ドット系による量子もつれの実証はむずかしいこと、60%以上のスピン注入効率で有意差が見られ、80%程度のスピン偏極率があれば、明瞭に量子もつれが観測できることを理論的に予測できた。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated surface reaction of Fe electrode and InAs substrate by thermodynamic calculation. We have fabricated a spin transistors with Fe electrode and verified current oscillation which agreed well with theoretical calculation. We have also fabricated an InAs nanowire spin transistor based on Au colloid and observed current oscillation which is presumably originates from spin-orbit interaction. In a spintransistor/quantum dot hybrid structure, we have theoretically demonstrated that spin polarization of 40% would be hard to verify quantum entanglement, but it would be appreciably large signal with 60% spin polarization and clear entanglement would be observable with 80% spin polarization in the spin channel.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,500,000	5,250,000	22,750,000
2009年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード：スピントランジスタ、スピン注入、スピントロニクス、量子計算、量子ドット、量子もつれ

1. 研究開始当初の背景

量子計算機のアルゴリズムが 1994 年に Shor によって示されて[1]以来、様々な実験が精力的に行われ、NMR により分子の核スピンを用いて 7 ビットの因数分解が示されるに至った。イオントラップ、光ファイバー/キャビティーなど多くの様々な系での進歩が目覚ましく進行している。一方、情報処理を行う半導体集積回路との整合性を考慮して、固体による量子計算機が指向され、その実現の基本単位である 2 量子ビットの量子もつれ状態の実現を目指して多くの研究が進行している。中でも、超伝導体を用いた方法が最も進んでいて 2 量子ビットのデモンストレーションが示されている。集積回路との整合性といえば半導体を用いた方法が最も将来の計算機実現に近いシステムとなる可能性が高い。半導体量子ドットを用いた方法には大きく分けて光操作(エキシトンを用いる)および電子(電流)操作(スピナー荷電変換を用いる)がある。集積回路との整合性を追求すれば電子操作がやはり望ましいのであるが、最も進んでいる 2 次元電子系を用いた方法(デルフト工科大、ハーバード大、東大でほぼ同一構造を追求)においても、これまで 2 量子ビット「量子もつれ」の実証にまでは至っていない。さて、当該グループがこれまで科学研究費補助金などの課題で行ってきた一連の「スピン注入(Fe/InAs)およびスピネル型スピン源(Fe₃O₄/InAs)」、「スピントランジスタ」、「単一量子ドット」の研究およびこれらを組み合わせた構造による「量子ビットの提案」は、量子閉じ込めが強く、より高温動作および 1 個のドットでの 1 量子ビット動作が確実におこなえることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の量子ドット/スピンチャンネル系によるスピンプロッケード観測のアプローチは量子ゼノ効果を援用するユニークなものであり、1 量子ドットを 1 量子ビットとする 2 量子ビットの実験がより容易に出来る優位性を有する。次の 3 つの段階を順番にクリアしていく。スピンプロッケードの実証から始まり、最終的に 2 量子ビットのもつれ状態を示すラビ振動の観測、量子トモグラフィ図を得ることまで行いたい。

3. 研究の方法

研究目的に書いた「スピン注入および高効率スピン源開発」、「チャンネル電子のスピン制御」、「積層量子ドットへのスピンプロッケードと量子もつれの検証」とほぼ同じ順番に課題と取り組む。

(1) スピン注入および高効率スピン源開

発

これまでの基盤研究の成果である高効率スピン注入の検証実験の経験を生かし、垂直に外部磁場を印加して行うが、今回、新材料で同様なアプローチをとり、これまでの結果を発展させるとともに実際の FET 構造の InAs チャンネルにスピン注入し、非局所 MR 測定および SpinFET 動作のデバイス動作で高スピン注入効率を電子的に実証する。これまで実証してきた Fe/半導体複合構造における問題点は、Fe/半導体界面の熱的安定性である。半導体上の鉄薄膜成長時における低温成長を用いた界面制御の重要性は報告してきたが、Fe/半導体界面の安定化を達成するための努力と平行して、100%近いスピン注入効率が可能でなおかつ熱的にも安定なホイスラ合金の探索を進める。

(2) チャンネル電子のスピン制御

様々な強磁性スピン源を用いて電流のスピン変調を調べる。スピン軌道相互作用の大きな InAs 系チャンネルでは、一般に DP 機構(D'yakonov-Perel)によりスピン緩和が大きいと予想されるが、実際はバルク反転非対称性と構造反転非対称性とが釣り合って相殺すると位相が一斉に揃って歳差運動をする、いわゆる Persistent Spin Helix 運動をするようになり、方向に寄らずスピン緩和が起こらず一斉に揃って歳差運動するようになること、またそのゲート電圧依存性などがよく理解できるようになった。鉄系のスピン源を用いて観測された電流(コンダクタンス)振動が理論計算とよく一致していることを確認した。この技術は、隣接の InAs 量子ドットへのスピン・ブロッケード測定を確実なものにするのに不可欠な技術となる。

(3) チャンネル積層量子ドットへのスピンプロッケードと量子もつれの検証

スピン・ブロッケード実験の予備実験としてチャンネル上に単一 InAs ドットを集積し、チャンネルからの単電子帯電効果をチャンネルの電流変化として感知するミクロマクロ変換をおこなう。これにスピン注入を取入れた構造(スピントランジスタに InAs 量子ドットを集積)でスピンプロッケード実験を行う。次に、交流磁場による ESR でのスピンプリップを試みる。そのための予備的な計算により、積層した InGaAs 系のドットの組成比を純粋の InAs から変えて行ったときの ESR の共鳴ピークが分離できることがわかり、その最低の組成比は約 10%程度であることが分かる。このような組成比の異なる積層ドットで ESR を試みる。

4. 研究成果

(1) スピン注入に関して

インジウム砒素系化合物半導体と鉄電極界面における界面反応により生成される化合物がスピン注入効率をブロックしていることを界面の相図を調べることにより探索した。具体的には CALPHAD 法 (Calculation of Phase Diagram and Thermodynamics) を用いて In, Fe, As の 3 元系の相図を求めた。[論文 12]

一旦系が 450K 近辺に上がると室温において As_2Fe , $AsFe$, $AsFe_2$ などの非磁化合物が生成することを示している。[論文 12, 15] このことは、室温 (300K) における高効率スピン注入結果と $170^\circ C$ 以上における測定限度以下のスピン注入の実験結果や界面 TEM 観察の結果をよく説明する。今後 Fe-As-In 系のスピン注入系のプロセス設計の指針を与える結果である。

高スピン偏極率を有するハーフメタルスピン源としてマグネタイト (Fe_3O_4) を用いた強磁性体/半導体構造の検討をおこなった。格子定数の近いインジウム砒素上に高品質のマグネタイトの分子線エピタキシー結晶成長に成功し、超伝導量子干渉計 (SQUID) による磁化特性の確認と相転移点 (Verwey 転移) 前後の振る舞いによりマグネタイト/インジウム砒素ハイブリッド構造の作製法を確立した。表面反転層の導電性のあるインジウム砒素上のマグネタイトの電気的特性の評価が困難なため酸化膜上のマグネタイト薄膜抵抗の温度依存性の評価から 120K 付近の転移点を確認した。[学会発表 18, 24, 27] 一方、インジウム砒素へのスピン注入効率の測定結果は、スピンドイオードからの円偏向測定も電気的な非局所測定によっても測定誤差以上の有意差が得られなかった。高品質のマグネタイトの成長条件として用いた基板温度 $400^\circ C$ においては、結晶成長中の RHEED 観測では捉えきれない界面反応が起こったのかもしれない。今後、酸素原子を含めた In, As, Fe, O の 4 元系の熱力学的相図計算を含めた界面反応の評価を進める必要がある。

(2) チャンネル電子のスピン制御

スピン注入効率は最大 40%と限られてはいるが、技術的に確立している鉄薄膜をスピン源とするインジウム砒素系ヘテロ構造半導体を用いた (2-1) チャンネル電子のスピン制御の検討[論文 5, 10, 14]、(2-2) スピン緩和が抑制される 1 次元インジウム砒素スピントランジスタのためのインジウム砒素ナノワイヤの MBE 結晶成長の探索[論文 1, 6]、(2-3) インジウム砒素ナノワイヤを用いた 1 次元インジウム砒素スピントラン

ジスタの作製[学会発表 32, 35]とスピン変調特性の評価をおこなった。[半導体超構造国際会議 (MSS) (2011 年 7 月)にて発表予定]

(2-1) 2次元電子チャンネル中の電子スピンの電界効果によりスピン歳差運動の物理的起源であるスピン軌道相互作用の制御について検討した。狭バンドギャップ半導体であるインジウム砒素系の半導体材料は化合物半導体の中でも大きなスピン軌道相互作用をもつことで知られている。それでもスピントランジスタを実現した場合にスピンの歳差運動で 2π 回転するのにチャンネル長が 0.2 ミクロン程度必要とする。将来技術としての集積回路のスケラビリティを考慮すると、さらにスピン軌道相互作用を増大させる必要がある。まず、半導体ヘテロ構造内部の各量子井戸内電界の効果、各界面の効果などに分解してその寄与を評価すると、従来考えられていたような単純な内部電界では説明できないこと、界面の効果が予想以上に効いていることが Zawadzki (1996) らによりインジウム砒系ヘテロ構造で報告されている。インジウム砒素系ヘテロ構造の場合において Zawadzki らに習い、 $k \cdot p$ 法による計算をおこない評価した。従来の単純なインジウム砒素系量子井戸構造の場合はインジウム砒系ヘテロ構造の報告と同様、量子井戸内部の電界よりも界面の寄与が効く結果であった。それよりも注目すべき結果は、入れ子型の 2 重量子井戸構造にして、波動関数のピークがメインチャンネルとサブチャンネル間の伝導帯不連続上に位置するようなヘテロ構造を設計すると界面の寄与が極端に効くために従来知られていた大きなスピン軌道相互作用 ($\alpha \approx 30 \times 10^{-12} \text{eVm}$) の 2 倍近い値が期待され、実験的に実証することができた [論文 5, 10, 14]。

このような構造においては標準的な InAs 量子井戸 (緑角のデータ) と比べて約 2 倍のラッシュバ係数を持っていることがわかった。

強磁性体/半導体界面から 100%のスピン注入がおこったと仮定し、ドレインに向けて輸送されているうちに起こるスピン緩和を抑制するには、Persistent Spin Helix と呼ばれる条件 (ラッシュバ効果とドレッセルハウス効果が釣り合った条件) では理想的にはスピン緩和が起こらず無限のスピン緩和長が実現することになるというシミュレーションでは取り入れられていない波数 (k) の 3 乗 (k^3) に比例する項を取り入れると、実際は InAs ヘテロ系で 5 ミクロン程になることが示された。[論文 16]

(2-2) 1次元インジウム砒素スピントランジスタのためのインジウム砒素ナノワイヤの MBE 結晶成長の探索

これまでMBEを用いたVLS法によるインジウムナノワイヤの様な太さの長さが3ミクロン程度に限られていることが知られていた。一方スピントランジスタなどへの応用のためには、強磁性電極やゲート電極を伴う構造やスピン拡散長評価のために多数の電極をつける必要があるため、成長機構に与える基板温度、各種分子線の圧力などの依存性を詳細に調べる必要があった。図5にその成長条件の与えるナノワイヤ成長速度の測定結果のまとめを示す。[論文1,6]

(2-3) 金コロイドを用いるインジウム砒素ナノワイヤの結晶成長の最適化を応用してナノワイヤスピントランジスタを作製した。ソース/ドレイン強磁性電極を電流方向に磁化したあとで残留磁化によりスピン注入をおこなう。図7において測定は室温、シングルショット測定(データの平均化はおこなわない)で、下から(1)as grown (2)電流方向に磁化(3)電流と直角に磁化のあとの電流電圧特性を示す。下部の黒色の波線はスピン軌道相互作用によるスピン電流の振動の計算結果である。電流方向に電極を磁化したときの電流振動によく一致していることがわかる。これらの結果は超構造半導体国際会議(MSS)(2011年7月、米国タラハッシ)において公表予定である。

(3) チャンネル積層量子ドットへのスピントラップと量子もつれの検証

これまで実験的に実績のあるスピン注入効率が最大40%(実績37%)のFe/InAs強磁性/半導体ハイブリッド系では、スピンチャンネル/量子ドット系による量子もつれの実証はむずかしいこと、60%以上のスピン注入効率で有意差が見られ、80%程度で明瞭に量子もつれが観測できることを理論的に予測できた。[論文13]

提案の量子系で2量子ビットをチャンネルに最近接の量子ドットのスピン状態を測定(スピントラップを用いる)により量子もつれ状態を実現するスキームを考案し、量子状態トモグラフィを計算した。

2量子ドットを積層したスピントランジスタ構造におけるベル状態の量子状態トモグラフィ[論文13]において、スピンチャンネルのスピン偏極率を右肩に示してある。鉄、コバルト、ニッケル程度のスピン偏極率($r=0.4$)ではほとんど有意差が見られないが、0.6以上からは実験にかかるとわかる。今後さらに高いスピン偏極率の材料開発を実験的に示していくことが望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計20件)

1. J. Bubesh Babu and Kanji Yoh, "Growth rate enhancement of InAs nanowire by molecular beam epitaxy, 査読有, **J.Crystal Growth**, , 322, pp.10-14 (2011).

2. Keita Konishi and Kanji Yoh, "Fabrication of p-n-p graphene structure and observation of current oscillation," 査読有, **Jpn.J.Appl. Phys.**, 50, 06GF13(2011).

3. Tomotsugu Ishikura, Zhixin Cui, Takashi Matsuda and Kanji Yoh, "Thermal stability of Pd Gate in Pseudomorphic InGaAs Heterostructures," 査読有, **Jpn.J.Appl.Phys.**, 50, 06GF19(2011).

4. Liumin Zou, Keita Konishi, and Kanji Yoh, "Proposal of Graphene Bandgap Control by Hexagonal Network Formation," 査読有, **Jpn.J.Appl.Phys.**, 50, 06GF14(2011).

5. Takashi Matsuda and Kanji Yoh, "Effect of strain on the Dresselhaus effect of InAs-based heterostructures", 査読有, **J.Crystal Growth**, 323,52-55, 2011.

6. J. Bubesh Babu, Kanji Yoh, "Effect of As/In-flux on the growth of InAs nanowire by molecular beam epitaxy", 査読有, **J.Crystal Growth**, 323, 301-303, 2011.

7. 陽 完治、小西敬太「SiC上のエピタキシャルグラフェンの成長と電子輸送特性」査読有、日本結晶成長学会誌 Vol.37, No.3, pp.214-219, 2010

8. J. Bubesh Babu and Kanji Yoh, "Evolution of pyramid morphology during InAs(001) homoepitaxy," 査読有, **Appl. Phys. Lett.** 97, 072102 (2010)

9. Keita Konishi, Kanji Yoh, "Transport characteristics of a single-layer graphene field-effect transistor grown on 4H-silicon carbide," 査読有, **Physica E** 42, 2792-2795 (2010)

10. Takashi Matsuda and Kanji Yoh, "Possible Sign Reversal of Rashba Coefficient in InAs-based Heterostructures", 査読有, **Physica E** 42, 979-983 (2010)

11. Kanji Yoh, Keita Konishi, Hiroki Hibino, "Epitaxial graphene FETs with high on/off ratio grown on 4H-SiC", 査読有, IEEE 9th IEEE

Conference on Nanotechnolog. 2009. IEEE-NANO2009, pp. 334-336(2009)

12. M.Ohno and K.Yoh, “Thermodynamic Calculation of Phase Equilibria in As-Fe-In Ternary System Based on CALPHAD Approach,” 査読有,**Materials Transactions**, Vol.50 (2009) pp.1202-1207

13. Kazuya Yuasa, Koske Okano, Hiromichi Nakazato, Saori Kashiwada and Kanji Yoh, “State Tomography of a Chain of Qubits Embedded in a Spin Field-Effect Transistor via Repeated Spin Blockade Measurements on the Edge Qubit”, 査読有,**Phys.Rev.B**.79, 075318 (2009)

14. Takashi Matsuda and Kanji Yoh, “Enhancement of Spin-Orbit Interaction by Bandgap Engineering in InAs-Based Heterostructures”, 査読有,**J.Electronic Materials**, 37, 1806 -1810 (2008)

15. Munekazu Ohno and Kanji Yoh, “Thermodynamic modeling of As-Fe system combined with first-principles total energy calculations”, 査読有,**J.Crystal Growth**, 310, pp.2751-2759 (2008)

16. M. Ohno and K. Yoh, “Time-resolved and space-resolved Monte-Carlo analyses on spin relaxation anisotropy in InAs heterostructure”, 査読有,**Physica E** 40 (2008) 1539-1541

17. Munekazu Ohno and Kanji Yoh, “Datta-Das type Spin-Field-Effect Transistor in Non-Ballistic Regime” 査読有,**Phys. Rev. B** 77, 045323 (2008)

18. Bruno Bellomo, Giuseppe Compagno, Hiromichi Nakazato, Kazuya Yuasa “Extraction of a Squeezed State in a Field Mode via Repeated Measurements on an Auxiliary Quantum Particle”, 査読有, **Phys. Rev. A** 80 (2009) 052113

19. Antonella De Pasquale, Kazuya Yuasa, Hiromichi Nakazato “State Tomography of a Qubit through Scattering of a Probe Qubit” 査読有, **Phys. Rev. A** 80 (2009) 052111

20. Yuichiro Hida, Hiromichi Nakazato, Kazuya Yuasa, Yasser Omar, “Entanglement Generation by Qubit Scattering in Three Dimensions” 査読有, **Phys. Rev. A** 80 (2009) 012310

[学会発表] (計 37 件)

1. Kanji Yoh and Keita Konishi, “Observation of 6 micrometer long spin transport in a graphene multilayers”, the 2nd IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (Kyoto University, October 20- 22, 2008)

2. Takashi Matsuda and Kanji Yoh, “Anomalous Rashba Effect in Double Cladding InAs-Based Quantum Well”, the 2nd IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (Kyoto University, October 20- 22, 2008)

3. Kanji Yoh, “Non-equilibrium Transport Issues on Graphene Field-Effect, Current saturation and Spin transport (Invited) ” International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics and Modeling (University of Aizu, November 17 - 19, 2008)

4. Kanji Yoh, “Fabrication and Characterization of Graphene Transistors grown on SiC (Invited) ”, **Okazaki Conference From Aromatic Molecules to Graphene: Chemistry, Physics and Device Applications** (Institute of Molecular Science, Okazaki, Japan, February 21 – 23, 2009)

5. Kanji Yoh and Keita Konishi, “Fabrication and characterization of graphene transistor on SiC”, 2009 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (Sapporo, Japan, March 2-3, 2009)

6. Takeshi Ejiri, J.Bubesh Babu, Keita Konishi and Kanji Yoh, “Fabrication of magnetite/InAs heterostructure and application for spin injection”, 2009 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (Sapporo, Japan, March 2-3, 2009)

7. Keita Konishi, Kanji Yoh, Hiroki Hibino “Top-gated Graphene FETFormed on Semi-insulating 4H-SiC”, 2009 RCIQE International Seminar on “Advanced Semiconductor Materials and Devices (Sapporo, Japan, March 2-3, 2009)

8. Keita Konishi and Kanji Yoh, “Transport characteristics of a single-layer graphene field-effect transistor on 4H silicon carbide”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (Kobe, Japan, July 19 – 20, 2009)

9. Takashi Matsuda, Kanji Yoh, “Possible Sign Reversal of Rashba Coefficient in InAs-based Heterostructures”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (Kobe, Japan, July 19 – 20, 2009)

10. Keita Konishi, Hiroki Hibino, Kanji Yoh, “Epitaxial graphene FETs with high on/off ratio grown on 4H-SiC”, IEEE 9th IEEE Conference on Nanotechnology (Genova, Italy, July 26 – 30, 2009)

11. Keita Konishi, Hiroki Hibino, Kanji Yoh, “Epitaxial graphene FETs with high on/off ratio grown on 4H-SiC”, IEEE 9th IEEE Conference on Nanotechnology (Genova, Italy, July 26 – 30, 2009)

12. J. Bubesh Babu and Kanji Yoh, “Effect of As/In-flux on the growth of InAs nanowire by molecular beam epitaxy”, International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010) (Berlin, Germany, August 23 – 27, 2010)

13. Takashi Matsuda and Kanji Yoh, “Strain Effect on the Dresselhaus Effect of InAs-based Heterostructures”, International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2010) (Berlin, Germany, August 23 – 27, 2010)

14. Zhixin Cui, Keita Konishi, Tomotsugu Ishikura, Bubesh Babu, Kanji Yoh, “Fabrication of Spin Transistors Based on InAs Nanowire”, Microprocess and Nanostructure Conference (MNC 2010) (Kokura, Japan, November 9 – 12, 2010)

15. Tomotsugu Ishikura, Zhixin Cui, Takashi Matsuda and Kanji Yoh, “Electrical Characterization of Pd Gate InAs-based Heterostructure”, Microprocess and Nanostructure Conference (MNC 2010) (Kokura, Japan, November 9 – 12, 2010)

16. Keita Konishi and kanji Yoh, “Fabrication of p-n-p graphene structure and observation of current oscillation,” Microprocess and Nanostructure Conference (MNC 2010) (Kokura, Japan, November 9-12, 2010)

17. 小西敬太、松田喬、陽 完治「グラフェン単層膜における Schubnikov de Haas 振動」第69回応用物理学会学術講演会(中部大学、2008年9月2日-9月5日)、講演番号 3a-ZR-9、講演予稿集 p.1223

18. 松田喬、小西敬太、陽 完治「InAs 系 HEMT 構造中のスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性とその測定」第69回応用物理学会学術講演会(中部大学、2008年9月2日-9月5日)、講演番号 5p-R-2、講演予稿集 p.668

19. Kanji Yoh, “On the Critical Conditions for Successful Operation of Datta-Das-type Spin Transistor at Room Temperature (招待講演)” 日本磁気学会 第32回学術講演会 シンポジウム「Integration of Metallic and Semiconductor Systems in Spin Electronics」(東北学院大学、2008年9月12日-15日)

20. 江尻剛士、J.バベシュ バブ、陽 完治「スピン注入のためのマグネタイト半導体ハイブリッド構造の作製」第56回応用物理学会関係連合講演会、講演番号 1p-TB-17、講演予稿集 p789 (筑波大学、2009年3月30日-4月2日)

21. 小西敬太、陽 完治、日比野浩樹「半絶縁性 4H-SiC 基板上に作製したグラフェン FET(2)」第56回応用物理学会関係連合講演会、講演番号 1a-ZA-2、講演予稿集 p1411 (筑波大学、2009年3月30日-4月2日)

他16件

[図書](計1件)

1. 陽 完治、「カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック」第12章1.2節「固体上のグラフェン成長技術」、コロナ社 2011年発刊予定

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陽 完治 (Yoh Kanji)

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授
研究者番号：60220539

(2) 研究分担者

末岡 和久 (Sueoka Kazuhisa)

北海道大学・情報科学研究科・教授
研究者番号：60250479

(3) 研究分担者

中里 弘道 (Nakazato Hiromichi)

早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：00180266