

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25246005

研究課題名(和文)量子ドットを使った光子-スピン間の量子状態転写と非局所もつれ生成の研究

研究課題名(英文) Studies on quantum state transfer and creation of entanglement between photons and electron spins using quantum dots

研究代表者

大岩 顕 (OIWA, Akira)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：10321902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：量子力学を動作原理とする量子情報通信や量子コンピュータの研究は、安全でかつ大容量・高速な情報処理への要求から急速に進展している。本研究では、量子通信で不可欠な量子中継の基盤技術を、電気制御性に優れた量子ドット中の電子スピンを使って確立することを目指してきた。まず単一光子が生成する単一電子スピンの検出を達成し、単一円偏光光子と光生成単一電子スピンの間で量子状態転写の実現可能性を示す角運動量転写を実証した。さらにもつれ光子対源を導入して、光子と量子ドット中の光生成単一電子の同時検出を達成した。電気制御量子ドットとして初めて、量子中継で重要な遠隔地点へのもつれ配信へつなげる重要な成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Studies on quantum communications and quantum computing, of which operating principles are based on quantum mechanics, are rapidly developing because of the demands on secure, large capacity, and high speed information processing. In this work, we aim at realizing the basic technologies of quantum repeaters indispensable for quantum communications using electron spins confined in electrically controllable quantum dots (QDs). First, we achieved the detection of single photo-electron spins and verified the angular momentum transfer between circularly polarized photons and electron spins, indicating the feasibility of quantum state transfer. Furthermore, we accomplished the simultaneous detections of a photon of an entangled photon pair and an electron generated by the other photon of the pair in a QD. For the first time to the electrically controllable QDs, we obtained a crucial achievement toward entanglement distribution among remote locations, which is required for quantum repeaters.

研究分野：半導体低次元物性

キーワード：量子ドット 光子 電子スピン 量子状態転写 量子中継 量子もつれ

### 1. 研究開始当初の背景

量子力学を原理とする量子情報通信・処理や量子計算は、21世紀の高度情報社会を支える絶対に安全でかつ大容量・高速な情報処理方法として重要なだけでなく、現代物理学の英知を集めた最先端研究である。近年、光子と固体量子ビットとの結合あるいは量子状態転写は、例えば共振器量子電気力学など量子物理学の興味深い課題を提供すると同時に、量子情報の長距離伝達に不可欠な量子中継器や、量子インターフェースへの応用にとって重要な課題である。

半導体量子ドット中のスピンは、量子ビットとしてももちろん、光の偏光との結合性や通信波長との整合性の良さで、量子インターフェースを実現する最適な候補である。特にスピンと光偏光の量子状態転写について、理論提案[1]がなされ、その後、量子井戸構造で実証実験がなされた[2]。しかしこの実証実験は多数光子と多数スピンとの間で、量子情報技術で求められる単一量子間での量子状態転写はまだ実現されていない。国外では、InAs 自己形成量子ドットやダイヤモンド窒素空孔中心の電子スピンと光子の量子状態転写や光 - スピン非局所もつれの研究が様々な手法で活発に行われ、大きな進展を見せている[3]。また国内でも量子中継器に特化し、様々な物理系の包括的な大規模プロジェクトが進行している。これらの状況は、量子状態転写ともつれ配信の研究が重要で緊急性が高いことを示している。

### 2. 研究の目的

半導体量子ドットを舞台とし、単一光子の偏光状態と単一電子スピン状態を使った、光量子状態の転写、伝達、操作の3つの基本操作を実現することにより、量子情報処理で不可欠な量子中継器や量子インターフェースに飛躍的な発展をもたらす基盤技術・概念を提供する。また固体量子と光子を使って量子物理学の新しい学理を開く量子力学的実験を提案・実現する。まずこれまでに達成した単一光子検出と電気的単一スピン検出を駆使し、光子から電子スピンへの単一量子間での角運動量転写から、さらに量子状態転写の実現を目指す。次にもつれ光子対源を導入し、転写した電子スピンと光子の間で非局所もつれの生成を実現し、もつれを利用した長距離伝達の可能性を示す。さらに転写した電子スピンに対する量子ゲートを実現し、光転写情報の演算処理の基盤技術を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究は上記の目的を達成するために以下の研究課題を遂行した。課題(1)と(4)の量子状態転写の基礎過程の実証と高効率化を研究代表者の阪大グループが担当し、(2)と(3)のもつれ光子対に関連する実験と高周波電場を用いた電子スピン操作を研究分担者の東京大学グループが担当した。研究協力者

として、ドイツルール大ポーフムグループが分子線エピタキシーによる高品質 GaAs 量子井戸基板の成長を担当した。

#### (1) 単一光子 - 単一電子スピン間の量子状態転写の実現

根幹となる単一光子偏光と単一電子スピンの量子状態転写の実証とそのためのスピン検出の高精度化に取り組んだ。初期の理論提案[1]のV字遷移(1つの正孔スピン重ね合わせ状態から2つの電子スピン状態へ励起)に基づき、g因子制御 GaAs 系量子井戸中の二重量子ドットとその近傍に設置した量子ポイントコンタクト電荷計を使って、円偏光単一光子照射とパウリスピンブロックによる光生成単一スピン検出から、角運動量転写と、さらに量子状態転写の実証を試みた。量子状態転写では、正孔のスピン重ね合わせ状態を励起するため(001)GaAs 基板上の量子ドットでは重い正孔状態はゼーマン分裂を起こさないで軽い正孔を使う必要がある。しかし面方位が異なる(110)GaAs 基板上ではより励起効率が高い重い正孔も横磁場下でスピン重ね合わせ状態が生成できるため、量子状態転写が可能となると期待される。そこで(110)面上の GaAs 量子井戸中の重い正孔状態を使った量子状態変換実証にも取り組んだ。

#### (2) もつれ光子対光源を用いた光子 - 電子スピンもつれ生成

もつれ光子を用いた量子中継では、空間的に離れた量子ビット(ノード)へもつれ光子対を配信して、非局所もつれを生成する必要がある。本研究では、既存のチタンサファイアレーザを使って、高いもつれ光子対生成レートを実現するために、高強度励起光源用の固体レーザを導入して、もつれ光子対源を構築し、同時検出偏光もつれ相関の評価を行った。続いて片方の光子から単一電子スピンへ量子状態変換を施し、もう片側の光子の偏光状態との間に非局所もつれを実現することを目指した。

#### (3) 転写スピン状態の量子ゲート操作

光子からスピンへ転写された情報には何らかの演算(スピン回転操作)を施す必要が生ずる。例えばもつれ光子を用いた量子中継では、ある中継地点で異なるもつれ光子対から送信された2つの光子を2つの電子スピンへ量子状態転写し、その電子スピンに対してベル測定を行うことで、もともともつれていなかった離れた光子にもつれを生成し、遠隔地へ量子状態を送信できる。このように光子から転写された単一電子スピン操作は、スピンを利用した量子情報通信では不可欠である。また量子状態転写の実証では観測基底回転によりプロット全体を測定するスピン状態トモグラフィが求められる。このような光生成電子スピン操作を見据え、本提案では量子状態転写により二重量子ドットに生成された電子スピンに対する1電子スピン回転操作の実現を目指した。電子スピン操作法

としては、高周波誘導磁場を誘起する微小コイルや、傾斜磁場を作る微小磁石など付加的な構造を必要としない、スピン軌道相互作用を利用した方法を採用した。

#### (4) 光子 - 量子ドット結合の効率化

光子と量子ドットの結合効率の向上は、量子情報処理への応用だけでなく、正確な実験を行う上でも重要な課題である。そこで量子状態転写に必要な量子井戸を分散型ブラッグ反射器 (DBR) 構造上に成長して、そこに形成した量子ドットを共振器中に組み込むことで、ドットと光子との結合の大幅な向上を実現する。また新たな高効率結合の方法として、表面プラズモンアンテナを使う方法も新たに着想し、電磁場シミュレーションによる解析にも取り組んだ。

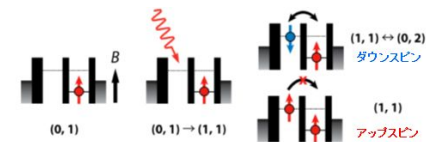
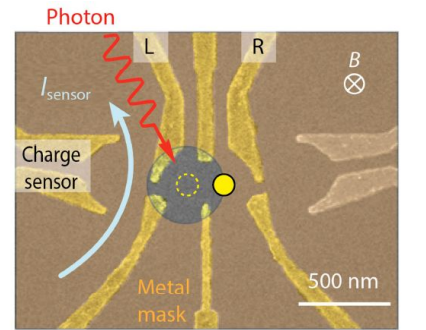
### 4. 研究成果

#### (1) 単一光子 - 単一電子スピン間の量子状態転写の実現

量子状態転写の条件を満たす量子井戸基板に二重量子ドットを作製した (図 1)。この 2 重ドットの共鳴ドット間遷移を利用し、光生成単一電子が左右の量子ドット行き来する様子を実時間検出することで、信頼性の高い光生成単一電子検出を実現した [4]。さらにこのドット間遷移検出とパウリスピン閉塞を組み合わせて、光生成単一電子のスピンの検出を実現するとともに (図 1)、円偏光単一光子と単一電子スピンの一対一の対応を示す角運動量転写を実証した [5]。これは量子状態転写実現に向けて大きな前進である。この角運動量転写実験は、光の波数方向と平行な垂直磁場下で、重い正孔状態の励起により行われたため、量子状態転写の条件を満たしていないが、励起光子エネルギー依存性から、軽い正孔も選択的に励起でき、量子状態転写が十分可能であることを示した [6]。

このスピン検出はパウリスピン閉塞を利用しているが、そのスピン検出の正確性の要因を明らかにすることは正確な量子状態転写の実現にとって重要である。我々は、その正確性はスピン閉塞の堅牢性に依存しており、二電子スピン状態の実時間測定からスピン閉塞の緩和を測定し、その緩和機構を明らかにした [7]。特に本研究では中磁場から高磁場にかけて、従来報告されていた核スピンとの超微細相互作用ではなく、スピン軌道相互作用を介したドット間遷移によるスピン緩和がスピン閉塞緩和の主たる要因であり、この磁場範囲で高いスピン検出正確性が得られることを明らかにした [7]。

より正確なスピン検出法についても検討を行い、垂直磁場下で GaAs 量子ドットの近傍に生ずる量子ホールエッジ状態と軌道状態によるスピン依存トンネルを利用した新



1. 初期化 2. 光子照射 3. 光生成単一電子スピン検出

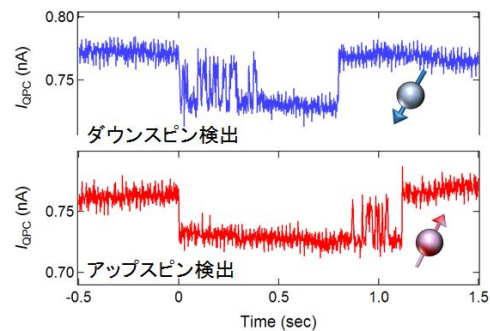


図 1 : (上) 角運動量転写実験に用いた二重量子ドットの電子顕微鏡写真。二重ドットの横に電荷検出用の量子ポイントコンタクトを備える。遮光マスクで覆われている。左ドット上の開口を優先的に光子が透過する。(中) 光生成単一スピン検出法の模式図。(下) 量子状態転写二重量子ドットにおけるスピン依存ドット間遷移 (パウリスピン閉塞) を利用した光生成単一電子スピン検出を示す電荷検出結果。

しいスピン検出法を着想し、実証することに成功した [8]。2 電子スピン状態に対して、従来、一重項と三重項の 2 種類しか区別できなかったが、本手法により、一重項と三重項の  $T_0$  と  $T_+$  を区別して検出することに成功した [8]。今後は光生成単一電子スピン検出への応用を検討する。

こうした成果を積み重ねることで量子状態転写の実験を着実に遂行し、実証に向けた様々な周辺技術と知見を得ることができ、単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写の実証の実現に大きく近づくことができた。

#### (2) もつれ光子対光源を用いた光子 - 電子スピンもつれ生成

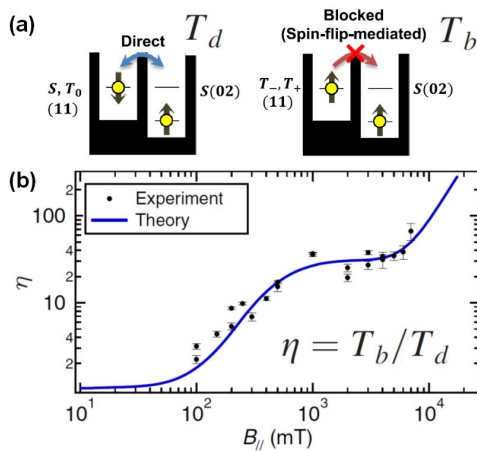


図 2: (a) 直接ドット間遷移時間  $T_d$  とパウリスピン閉塞緩和時間  $T_b$  の模式図。(b)  $T_d$  と  $T_b$  の比の磁場依存性。中磁場で平坦になる領域がスピン軌道相互作用によってパウリスピン閉塞が緩和する領域。

光子から電子スピンへの量子状態転写東大グループが、もつれ光子源を構築し、もつれ光子の一つの光子を量子ドットへ照射し、もう片方の光子を単一光子検出器で検出し、同時検出の相関を検証した。まずもつれ光子対源として、BBO 非線形光学結晶を使ったパラメトリック下方変換による生成を行い、偏光相関を持つ 2 光子の同時検出を達成した。次に、この偏光もつれ光子対を光源として、一方の光子を量子ドットで吸収し、単一電子へ変換して単一電子電荷計で検出し、他方の光子を単一光子検出器で計測することにより、両者の同時検出を確認した。検出された単一電子のうち 10-12%が単一光子と同時検出であること、その確率はもつれ光子対の生成確率と同程度であることを確認した。この成果は、量子中継の基盤技術である光-スピン間のもつれ変換のための重要な結果である。

### (3) 転写スピン状態の量子ゲート操作

もつれ配信型量子中継では各中継点で光生成電子スピんにベル測定を行い、ノード間にもつれを配信する必要がある。また量子状態転写の実証では、検出用電子スピンを回転することで観測既定を変えて、光子から転写された電子スピン状態のプロッホ球全体を測定する必要がある。このように光子から転写された単一電子スピン操作は、スピンを利用した量子情報通信では不可欠である。

我々は量子状態転写用に作製した量子ドットをスピン閉塞状態に調整しておき、そこで高周波を印加し、電場誘起電子スピン共鳴信号を観測した。そのメカニズムはスピン軌道相互作用と考えられる。このように単一光子の吸収によって量子ドットに捕捉される単一電子スピんに回転操作を施すことができる技術を確認できた。

### (4) 光子-量子ドット結合の効率化

光子から電子への変換効率を高くす

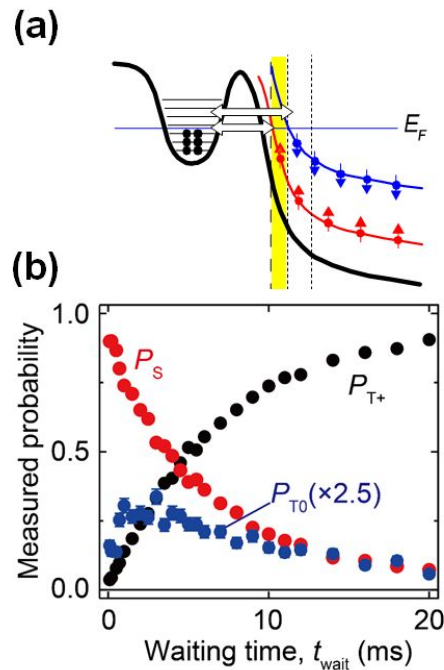


図 3: (a) 量子ドットに結合した量子ホールエッジ状態によるスピン依存トンネルの概念図。(b) エッジ状態とトンネル結合の軌道依存性を組み合わせて実現した 2 電子スピン状態のうち 3 状態検出の結果。

ることは、量子中継における高転送レートを実現するために必須であるだけでなく、量子状態転写の実証やもつれ変換など高度な実験を実現するためにも不可欠である。そこで本研究では光子から電子スピンへの変換の高効率化にも取り組んだ。

1 つは、量子状態変換過程の内部効率の向上である。量子状態変換の理論[1]では、横磁場下でゼーマン分裂を示す軽い正孔状態を使うが、状態密度の大きい重い正孔を使えば高効率な量子状態転写が可能になる。そこで面内磁場に対して重い正孔の  $g$  因子がゼロでない(110)GaAs 量子井戸をボーフム大グループが作製し、阪大グループが量子状態転写をアンサンブルで実証するため時間分解磁気光学効果測定を行った。量子状態転写の実証には至っていないが、電子の  $g$  因子や、重い正孔状態の  $g$  因子の上限など量子状態転写の条件を抽出すると同時に、重い正孔のゼーマン分裂状態を区別して励起するため、回折格子を導入して励起光の狭帯域化を図るなど、(110)GaAs 量子井戸における量子状態転写条件の抽出が完了した。また次のステップでは(110)GaAs 量子井戸を使って量子ドットを形成して、単一量子間の変換を研究する。しかし(110)GaAs 2 次元電子における量子伝導測定の報告例がほとんどないため、表面ゲートやオーミック電極の作製法を確立して量子ポイントコンタクトの動作確認を行い、単一量子間変換のため量子ドットの作製まで達成した。



2 つ目は、光子と電子の結合効率向上である。その方策の一つは、薄い量子井戸の低い吸収を改善するため基板下部にブラッグ分散反射器 (DBR) を作製することである。量子状態転写波長と整合するよう設計し、実際に基板を成長して、その反射率から DBR の特性を確認できた。さらに量子ドットを作製し光子検出実験を行ってきたが、残念ながら光子生成単一電子検出実験では期待された変換効率の向上は得られていない。これとは別に新たに表面プラズモン構造を利用することを着想した。これによりビームサイズと量子ドットの大きさの不整合を解消し、外因的要因による結合効率の低下を改善できる。量子ドット上にブルズアイ構造を取り付けた素子の透過率の電磁場シミュレーションを行い、透過率が 50 倍程度増大することが分かった[8]。現在、実験による実証を進めている。これらの効率改善の対策は、将来の高速量子情報通信にとってももちろん重要であるが、量子状態転写の実証など光子-電子スピン変換の基礎研究を加速する上で重要な結果である。

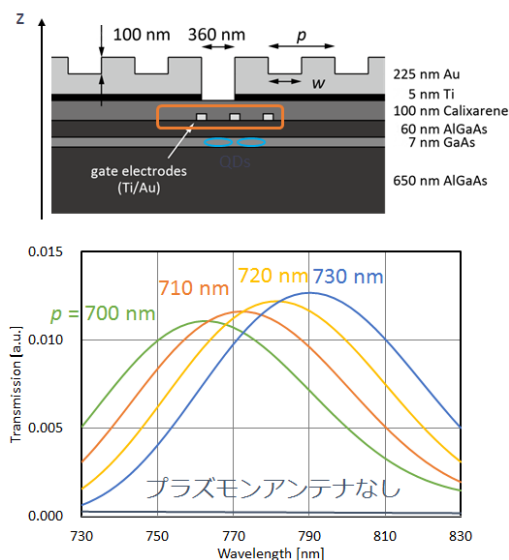


図 4：(上)量子井戸中に形成された二重量子ドット上に表面プラズモンアンテナ(ブルズアイ)構造を備えた素子の断面図。(下)電磁場シミュレーションで算出したブルズアイがある場合とない場合の透過率スペクトル。

以上のように、単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写の実証には至らなかったものの、単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写を達成し、高効率変換を確立しつつあり、量子状態変換の実証へ着実に進展している。また本研究では、もつれ光子対源を導入し、電気制御量子ドットとしては初めて、もつれ光子照射を実現し、光子と電子の同時検出を達成した[論文投稿中]。これは量子中継技術の開発だけでなく固体中の量子現象の研究での大きな成果が得られた。今

後、本研究成果を進展させ、量子中継技術を実現するための方向性と必要な技術の開発など十分な成果が達成された。

#### <引用文献>

- R. Vrijen and E. Yablonovitch, *Physica E*, 10, 2001, 569-575.  
 H. Kosaka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 2008, 096602.  
 B. Henson *et al.*, *Nature*, 526, 2015, 682-686.  
 T. Fujita *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 110, 2013, 266803.  
 T. Fujita *et al.*, arXiv: 1504.03696.  
 K. Morimoto *et al.*, *Phys. Rev. B*, 90, 2014, 085306.  
 T. Fujita *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 2016, 260802.  
 H. Kiyama *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 117, 2016, 236802.  
 R. Fukai *et al.*, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 56, 2017, 04CK04.

#### 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 14 件)

- A. Oiwa, T. Fujita, H. Kiyama, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, Conversion from Single Photon to Single Electron Spin Using Electrically Controllable Quantum Dots, *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 86, 2017, 011008 1-10, 10.7566/JPSJ.86.011008.  
 H. Kiyama, T. Nakajima, S. Teraoka, A. Oiwa, and S. Tarucha, Single-Shot Ternary Readout of Two-Electron Spin States in a Quantum Dot Using Spin Filtering by Quantum Hall Edge States, *Physical Review Letters*, 査読有, 117, 2016, 236802 1-5, 10.1103/PhysRevLett.117.236802.  
 T. Fujita, P. Stano, G. Allison, K. Morimoto, Y. Sato, M. Larsson, J.-H. Park, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, Signatures of Hyperfine, Spin-Orbit, and Decoherence Effects in a Pauli Spin Blockade, *Physical Review Letters*, 査読有, 117, 2016, 206802 1-5, 10.1103/PhysRevLett.117.206802.  
 K. Morimoto, T. Fujita, G. Allison, S. Teraoka, M. Larsson, H. Kiyama, S. Haffouz, D. G. Austing, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, Single photoelectron detection after selective excitation of electron heavy-hole and electron light-hole

pairs in double quantum dots, Physical Review B, 査読有, 90, 2014, 085306 1-5, 10.1103/PhysRevB.90.085306.

T. Fujita, H. Kiyama, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, Non-destructive Measurement of Single Photo-electrons by Inter-dot Tunneling in a Double Quantum Dot, Physical Review Letters, 査読有, 110, 2013, 266803 1-5, 10.1103/PhysRevLett.110.266803.

〔学会発表〕(計 75 件)

A. Oiwa, Conversion from single photon polarization to single electron spins in gate-defined GaAs double quantum dots, 1st International Conference on Topological Orders, Quantum Information, and Emergent Spacetime on Quantum Simulators, December 21 2016, Shanghai (China)

A. Oiwa, Conversion from single photons to single electron spins in gate-defined quantum dots, 33rd International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS2016), August 5 2016, Beijing (China).

A. Oiwa, T. Fujita, and S. Tarucha, Photon-electron spin coupling via angular momentum conversion in a gate-defined GaAs double quantum dot, International Symposium on Nanoscale Transport and Nanotechnology (ISNTT2015), Nov. 17-20, 2015, NTT 物性科学基礎研究所 (神奈川県・厚木市).

A. Oiwa, T. Fujita and S. Tarucha, Photon-electron spin coupling using gate-defined GaAs double quantum dots, SpinTech VIII, August 10-13 2015, Basel (Switzerland).

A. Oiwa, Conversion from single photons to single electron spins in electrically controlled quantum dots, American Physical Society March meeting 2014, March 3-7 2014, Denver (USA).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：

国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大岩 顕 (OWIA, Akria)  
大阪大学・産業科学研究所・教授  
研究者番号：10321902

(2) 研究分担者

樽茶清悟 (TARUCHA, Seigo)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：40302799

山本倫久 (YAMAMOTO, Michihisa)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号：00376493

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

Andreas D. Wieck (WIECK, Andreas D.)  
Ruhr-Universität Bochum