

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基板研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19310067

研究課題名(和文)

表面弾性波により形成した動的制御量子ナノ構造における光学特性解明およびスピン操作

研究課題名(英文)

Optical properties and spin manipulation in dynamic quantum nanostructures formed by surface acoustic waves

研究代表者

眞田 治樹 (SANADA HARUKI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究主任

研究者番号：50417094

研究成果の概要(和文)：

GaAs/AlAs 量子井戸上で表面弾性波(SAW)を発生させることにより作製した動的制御量子ナノ構造を用い、フォトルミネッセンスの強度および偏光異方性が空間位置と時間に依存する様子を調べ、SAW のつくるピエゾポテンシャル変調や同時に生じる歪によるバンド構造変調との関連性を明らかにした。また、電子・正孔分離状態を乱さずにスピンを計測できる空間・時間分解カー回転測定系を構築し、100 μm 以上という極めて長い距離を輸送される電子スピンダイナミクスの検出に成功し、半導体中のスピンの電氣的操作に不可欠なスピン軌道相互作用の精密解析を可能とした。

研究成果の概要(英文)：

We investigated optical properties of dynamic quantum nanostructures formed by surface acoustic waves (SAWs) in GaAs/AlAs quantum wells. We clarified the effects of the SAW piezoelectric potential as well as those of the strain-induced band-gap modulation on spatially- and time-resolved photoluminescence intensity and its polarization anisotropy. We also constructed a spatially- and time-resolved Kerr rotation measurement system to detect electron spin dynamics during transport over a distance of 100 μm . The technique enabled us to determine the strength of spin-orbit interaction, which is essential for the electrical spin manipulation in semiconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・ ナノ構造科学

キーワード：量子井戸, 量子閉じ込め, 表面弾性波, スピンエレクトロニクス, 光物性

1. 研究開始当初の背景

GaAsなどのピエゾ物質ではSAWが強いピエゾ電界を誘起することから、半導体、特に量子井戸構造での電子状態を制御することを目的とした物性研究が90年代半ばからドイツ、イギリスなどを中心に行われてきている。特に、SAWのピエゾ効果がタイプIIのバンド構造変化をもたらす発光再結合を抑制しキャリアを輸送できること(M. J. Hokin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **41**, 332 (1982)), 量子井戸からのフォトルミネッセンスを効果的に消光できること(C. Rocke *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 4099 (1997))は、光学特性を操る上で重要な発見である。また、電気伝導特性に関しては、SAWによる一次元伝導特性の観測(J. M. Shilton *et al.*, *J. Phys. Condens. Matter* **8**, 531 (1996))二次元電子ガスの狭チャンネルにおいてSAWによる単一電子輸送の実証、およびトラップした電子を量子ビットに用いることの提案(C. H. W. Barnes *et al.*, *Phys. Rev. B* **62**, 8410 (2000))などがなされている。

一方、半導体量子ドット構造の研究はこれまでに盛んに行われ、単一量子ドットの物性理解も大きく進展してきたが、従来の量子ドット形成手法では、サイズ揺らぎや欠陥の発生などの作製上の不可避な問題がいまだに多く残されており、量子ドットを再配列した量子ドット分子・結晶などへの展開は現状では難しい状況である。

2. 研究の目的

本研究は、表面弾性波を用いて半導体量子井戸構造の空間的なバンド構造変調を電気的に精密制御することにより、周期的に配置された均一な量子ドットアレーなどの動的制御量子ナノ構造を形成し、従来の作製法による量子ドット・量子細線とは異なる光学的・電気的特性を創出することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では以下の3つの課題に並行して取り組む。

(1)動的制御量子ナノ構造における量子閉じ込め効果: SAWによるポテンシャル変調の空間周期を短くすると量子閉じ込めエネルギーが増大することに着目し、高いSAW強度および高周波動作を達成することにより、PL・PLE特性において直接的な量子効果の検証を目指す。

(2) SAWによるキャリアスピンの空間操作: SAWによって電子スピンを空間輸送し、操作することを目指す。SAWによる格子歪・垂直電界強度、および伝播方向依存性を調べるこ

とによって Dresselhaus 効果・Rashba 効果の定量的な評価を行う。

(3)従来型量子ドットの SAW による高機能化: 従来型の量子ドットやフォトニック共振器のデバイス機能を高めることを期待し、高Qフォトニック共振器に量子ドットを埋め込んだ構造を用い、SAWにより共鳴準位を制御することによるオンデマンド単一光子パルス発生を目指す。

4. 研究成果

(1) 動的制御量子ナノ構造の大きな特徴は、SAWがもたらすバンド構造変化が、場所および時間に依存することである。実験では、MBE法で作製したGaAs/AlGaAs量子井戸試料の表面にAlのダブルフィンガー型トランスデューサーを形成しSAWを発生させることによりダイナミックワイヤやダイナミックドットを形成した。発光特性の測定にはSAWに同期したパルス励起光源を用い、空間分解および時間分解した発光スペクトル測定を行った。図1はダイナミックドットに2種類存在するポテンシャルドット・歪ドットそれぞれの特徴を明瞭に捉えた実験結果である。発光強度の空間変化はピエゾポテンシ

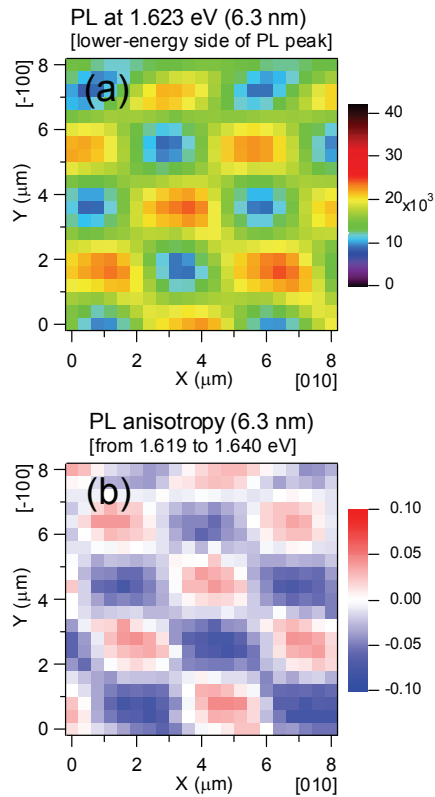


図1 厚さ 6.3 nm の量子井戸に SAW を印加したときの PL (a)および PL 偏光度(b)の空間分布。

yal変化に追従する電子・正孔のダイナミクスおよびバンドギャップ変化に敏感な励起子のダイナミクスにより決まる。さらに、ポテンシャル閉じ込め領域のみに生じる動的偏光異方性も観測し、SAWのつくるピエゾポテンシャル変調によるキャリア閉じ込めの際に同時に生じる歪によるバンド構造変化が発光波長シフトと強い偏光特性を生じさせることを明らかにした。

また、SAWは試料表面からの深さで変化するが、その影響がPL偏光度の変化として敏感に検知できることも理論・実験的に突き止めた。同一試料内に複数の量子井戸を配置した構造を用い、時間・空間分解の偏光PLから深さ依存性を系統的に明らかにした。さらに、ピエゾ電位が[110]と[1-10]で逆符号になる事を利用し、SAWで分裂したPLの偏光を電氣的に制御できることも解明した。

(2) SAWによるキャリア輸送では、電子・正孔の分離により電子スピン緩和時間を長くできるというスピンの応用上優位な特徴をもつ。しかし従来のPLによる計測ではSAWポテンシャル遮蔽用の金属電極が測定領域を限定しまうこと、励起子再形成後の速いスピン緩和などの問題点があった。そこで、電子・正孔分離状態を乱さずに計測できる空間・時間分解カー回転測定系を構築し、輸送される電子スピンを非破壊で検出することに成功した。図2に測定セットアップと実験結果を示す。スピンは極めて長い距離を輸送され、さらに無磁場にもかかわらずスピンの

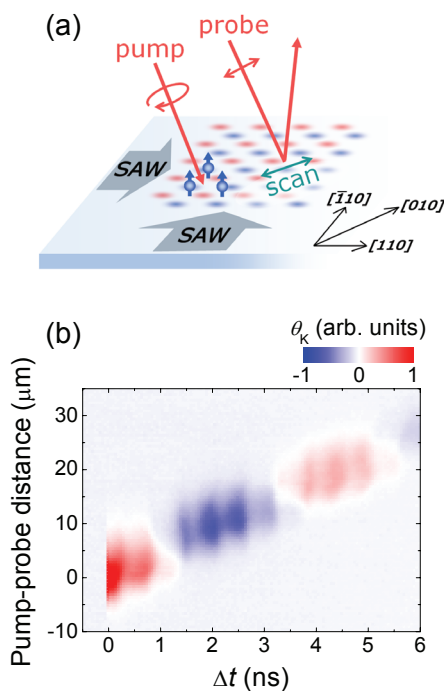


図2 (a) 測定セットアップ. (b) カー回転信号の空間・時間分解マッピング

歳差運動(0.23GHz)が観測され、スピン軌道相互作用の精密解析を可能とした。また、SAW定在波が磁気光学効果に変調を与えることも解明した。

(3) 動的・静的量子ドットの光学特性の対比、及びSAWによる従来型ドットのリモート制御への応用を見据え、静的ドットの光学特性・スピン状態制御に着目した実験を行った。静的ドットはGaAs/AlGaAs量子井戸の界面ゆらぎで生じる量子ドットを用い、荷電励起子の発光の磁場依存性を系統的に測定した。図3に示す実験結果と理論計算とを比較することにより、これまで主な研究対象であった基底状態に加え、複数の励起状態のスピン配置と発光遷移の関係を解明した。

また、不純物準位に捕捉された励起子のSAW依存性に着目した実験も行った。MOCVDで成長した量子井戸試料上でSAW強度を増大していくと、PL強度は始め増加し、その後急激に消失した。比較的弱いSAWでもPLが消失する高純度試料とは異なる振る舞いである。このPL増加現象は、不純物準位に捕捉され非発光、或いは弱い振動子強度であった励起子を、SAW電界が叩き出し、自由励起子に変化させたためと考えられる。この効果はドット系におけるキャリア注入・引き出しに向けたSAWの有効性を示す結果である。

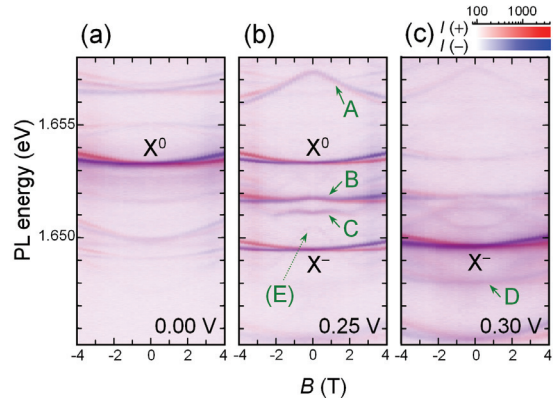


図3 バイアス 0, 0.25, 0.30 V のときの単一量子ドットからの PL スペクトルの磁場依存性。X⁰, X⁻は基底準位, A-D は励起準位からの発光。

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 9 件)

- (1) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, P. V. Santos, “Spatial and temporal modulation of photoluminescence properties in GaAs/AlAs dynamic quantum dots formed by surface acoustic waves”, *Physical Review B* **80**, 075304 (2009), 査読有.
- (2) G. Zhang, K. Tateno, H. Sanada, T. Tawara, H. Gotoh, H. Nakano, “Synthesis of GaAs nanowires with very small diameters and their optical properties with the radial quantum-confinement effect” *Applied Physics Letters* **95**, 123104 (2009), 査読有.
- (3) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, and P. V. Santos, “Photoluminescence dynamics in GaAs/AlAs quantum wells modulated by one-dimensional standing surface acoustic waves”, *Applied Physics Letters* **94**, 131912 (2009), 査読有.
- (4) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, “Controlling Quality Factor in Micromechanical Resonators by Carrier excitation”, *Applied Physics Express* **2**, 035001 (2009), 査読有.
- (5) H. Sanada, T. Sogawa, H. Gotoh, Y. Tokura, H. Yamaguchi, H. Nakano, and H. Kamada, “Magneto-optical spectroscopy of excitons and trions in charge-tunable quantum dots”, *Physical Review B* **79**, 121303 (2009), 査読有.
- (6) H. Sanada, T. Sogawa, H. Gotoh, H. Kamada, H. Yamaguchi, and H. Nakano, “Spin selective optical excitation in charge-tunable GaAs quantum dots”, *Physica status solidi (c)* **5**, 2904 (2008), 査読有.
- (7) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, “Thermoelastic damping in GaAs micromechanical resonators” *Physica status solidi (c)* **5**, 2920 (2008), 査読有.
- (8) T. Sogawa, H. Gotoh, Y. Hirayama, P. V. Santos, and K. H. Ploog, “Dimensional oscillation in GaAs/AlAs quantum wells by two-dimensional standing surface acoustic waves”, *Applied Physics Letters* **91**, 141917 (2007), 査読有.
- (9) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, and P. V. Santos, “Photoluminescence Dynamics of GaAs/AlAs Quantum Wells Modulated by Surface Acoustic Waves”, *Japanese Journal of Applied Physics* **46**, L758-L760 (2007), 査読有.

[学会発表] (計 29 件)

- (1) H. Sanada, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, T. Sogawa, “Dynamics of highly-polarized traveling spins measured using magneto-optic Kerr effect”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), 2010年7月27日 (予定), 韓国 ソウル
- (2) H. Gotoh, H. Sanada, H. Kamada, H. Yamaguchi, H. Nakano, “Spin initialization by polarization-resolved two-color optical pumping in quantum dots without static magnetic fields”, 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), 2010年6月4日, 高松.
- (3) T. Tawara, H. Kamada, S. Hughes, H. Okamoto, M. Notomi, H. Gotoh, “Role of Background Photons in a Strongly-Coupled Quantum Dot - Nanocavity System”, 37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2010), 2010年6月3日, 高松.
- (4) 眞田治樹, 後藤秀樹, 好田誠, 新田淳作, 小野満恒治, 山口浩司, 寒川哲臣, “表面弾性波により変調されたGaAs量子井戸中のキャリアスピンのもたらす磁気光学カー効果”, 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月17日, 東海大学湘南キャンパス
- (5) 後藤秀樹, 眞田治樹, 鎌田英彦, 山口浩司, 中野秀俊 “量子ドットの荷電励起子を用いた単一電子スピン初期化の解析”, 第57回応用物理学関係連合講演会 2010年3月17日, 東海大学湘南キャンパス
- (6) 俵毅彦, 鎌田英彦, S. Hughes, 岡本浩, 納富雅也, 後藤秀樹, “単一励起子-光子強結合状態の励起条件依存性” 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月17日, 東海大学湘南キャンパス
- (7) 岡本浩, 俵毅彦, 後藤秀樹, 鎌田英彦, “Biサーファクトントを用いたIn(Ga)As量子ドットのMOVPE成長と評価III”, 第57回応用物理学関係連合講演会, 2010年3月17日, 東海大学湘南キャンパス

(8) H. Okamoto, D. Ito, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, H. Yamaguchi, “Carrier-induced dynamic backaction in GaAs micromechanical resonators”, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009), 2009年10月8日, 仙台国際ホテル

(9) 岡本浩, 俵毅彦, 後藤秀樹, 鎌田英彦, 寒川哲臣, “Bi サーファクタントを用いた In(Ga)As 量子ドットのMOVPE成長と評価II”, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月10日, 富山大学

(10) 後藤秀樹, 眞田治樹, 鎌田英彦, 山口浩司, 中野秀俊, “ゼロ磁場における量子ドット中の荷電励起子を用いた単一電子スピンの初期化”, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山大学

(11) 俵毅彦, 鎌田英彦, S. Hughes, 岡本浩, 納富雅也, 寒川哲臣, “非共鳴励起下における励起子-共振器結合系の光子統計”, 第70回応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日, 富山大学

(12) G. Zhang, K. Tateno, H. Sanada, T. Tawara, H. Gotoh, H. Nakano, “Photoluminescence study of bare freestanding gallium arsenide nanowires grown by vapor-liquid-solid method”, CLEO/Pacific Rim 2009, 2009年9月1日, Shanghai International Convention Center

(13) 岡本浩, 俵毅彦, 後藤秀樹, 鎌田英彦, 寒川哲臣, “Bi サーファクタントを用いた通信波長帯量子ドットの成長と評価 II”, 電子情報通信学会電子部品・材料研究会, 2009年8月11日, 弘前大学

(14) H. Sanada, T. Sogawa, H. Gotoh, Y. Tokura, H. Yamaguchi, H. Nakano, “Excited-state spectroscopy of charged quantum dots in magnetic field”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), 2009年7月21日, 神戸コンベンションセンター

(15) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, P. V. Santos, “Polarization anisotropy of dynamic quantum wires formed by surface acoustic waves”, 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), 2009年7月20日, 神戸コンベンションセンター

(16) H. Yamaguchi “Heterostructure-based Micro/Nanomechanical Systems” (招待講演),

18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS18), 2009年7月20日, 神戸コンベンションセンター

(17) 眞田治樹, 鎌田英彦, 寒川哲臣, 後藤秀樹, 都倉康弘, 山口浩司, 中野秀俊, “磁場下における電荷制御量子ドットのエネルギー構造と発光遷移”, 第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年3月31日, 筑波大学

(18) H. Okamoto, D. Itoh, K. Onomitsu, H. Sanada, H. Gotoh, T. Sogawa, and H. Yamaguchi, “Vibration control in GaAs micromechanical resonators by optically induced piezoelectric backaction”, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2009), 2009年1月20日, NTT厚木研究開発センタ

(19) H. Yamaguchi, “Novel Functionalities in Semiconductor-based Micro/Nanomechanical Systems”, 21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2008), 2008年10月29日, 福岡

(20) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, and P. V. Santos, “Optical Properties of GaAs/AlAs Dynamic Quantum Wires Formed by One-Dimensional Standing Surface Acoustic Waves”, The IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference 2008(NMDC 2008), 2008年10月20日, 京都大学

(21) H. Yamaguchi, I. Mahboob, H. Okamoto, and K. Onomitsu, “Micro/Nanomechanical Systems Based on Semiconductor Heterostructures”, 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), 2008年9月21日, ドイツ ルスト

(22) 眞田治樹, 鎌田英彦, 寒川哲臣, 後藤秀樹, 都倉康弘, 山口浩司, 中野秀俊, “量子ドットにおける荷電励起子の基底・高次準位発光の磁場依存性”, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月4日, 中部大学(春日井キャンパス)

(23) 岡本創, 伊藤大介, 小野満恒二, 眞田治樹, 後藤秀樹, 寒川哲臣, 山口浩司, “キャリア励起によるカンチレバーの振動制御”, 第69回応用物理学会学術講演会, 2008年9月4日, 中部大学(春日井キャンパス)

(24) H. Sanada, T. Sogawa, H. Gotoh, H. Kamada, H. Yamaguchi, and H. Nakano,

“Spin characterization of excited trion in GaAs quantum dot”, The 5th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS V), 2008年8月5日, ブラジル イグアス

(25) 岡本創, 伊藤大介, 小野満恒二, 寒川哲臣, 山口浩司, “キャリア励起によるGaAsカンチレバーのQ値制御と自励発振”, 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月28日 東京

(26) H. Sanada, T. Sogawa, H. Gotoh, H. Kamada, H. Yamaguchi, and H. Nakano, “Spin selective excitation in charge tunable GaAs quantum dots”, The 34th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2007), 2007年10月16日, 京都大学

(27) 寒川哲臣, 眞田治樹, 後藤秀樹, 山口浩司, 宮下宣, P. Santos, “表面弾性波による動的制御GaAs量子ドットのPL偏光ダイナミクス”, 2007年秋季第68回応用物理学学会学術講演会, 2007年9月6日, 北海道工大

(28) 眞田治樹, 寒川哲臣, 後藤秀樹, 鎌田英彦, 山口浩司, 中野秀俊, “電荷制御GaAs量子ドットにおける偏光分解フォトルミネセンス”, 2007年秋季第68回応用物理学学会学術講演会, 2007年9月6日, 北海道工大

(29) T. Sogawa, H. Sanada, H. Gotoh, H. Yamaguchi, S. Miyashita, and P. V. Santos, “Dynamic polarization anisotropy of moving dots formed by surface acoustic waves”, The 13th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-13), 2007年7月19日, イタリア ジェノバ

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

(1)

名称: 半導体電子スピン操作方法および装置
発明者: 後藤秀樹, 眞田治樹, 寒川哲臣
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許権
番号: 特願2010-107252
出願年月日: 2010年5月7日
国内外の別: 国内

(2)

名称: スピン偏極キャリア生成素子およびスピン偏極キャリア生成方法
発明者: 眞田治樹, 後藤秀樹, 好田誠, 新田淳作
権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法

人東北大学

種類: 特許権

番号: 特願2009-222259

出願年月日: 2009年9月28日

国内外の別: 国内

(3)

名称: メカニカル素子

発明者: 岡本創, 山口浩司, 寒川哲臣, 小野満恒二

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許権

番号: 特願2008-069928

出願年月日: 2008年3月18日

国内外の別: 国内

[その他]

研究成果に関する Web ページ:

<http://www.brl.ntt.co.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

眞田 治樹 (SANADA HARUKI) (2007-2009)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所・量子光物性研究部・研究主任
研究者番号: 50417094

寒川 哲臣 (SOGAWA TETSUOMI)
(2007-2007)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所・量子光物性研究部・主幹研究員
研究者番号: 70211993

(2)研究分担者

後藤 秀樹 (GOTOH HIDEKI)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所・量子光物性研究部・主幹研究員
研究者番号: 10393795

俵 毅彦 (TAWARA TAKEHIKO)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所・量子光物性研究部・研究主任
研究者番号: 40393798

山口 浩司 (YAMAGUCHI HIROSHI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎
研究所・量子電子物性研究部・研究部長
研究者番号: 60374071

(3)連携研究者

該当なし