

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006 ~ 2008

課題番号：18360042

研究課題名（和文） 光による結合量子ドットのスピン操作

研究課題名（英文） Optical spin manipulation of coupled quantum dots

研究代表者

竹内 淳 (TAKEUCHI, Atsushi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80298140

研究成果の概要:半導体量子ドットのスピンを光によって操作するには、高いスピン偏極率や、長いスピン緩和時間の実現が望まれる。本研究では、均一性が高い量子ドットの第二励起準位で、円偏光励起によって 45 %もの高いスピン偏極率の初期値が得られることを明らかにした。また、柱状の形状を持ち縦方向に量子力学的に結合したコラムナ量子ドットで、円偏光励起によって 5.3 ns もの長いスピン緩和時間が得られることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2007 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：光プロセッシング，量子ドット，スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

半導体中のスピン偏極はある緩和時間をもって消滅するが、これをスピン緩和と呼ぶ。申請者は 1990 年から、いち早くこの解明に取り組む(A. Tackeuchi et al., APL 56 (1990) 2213)、これまでに、GaAs 量子井戸(A. Tackeuchi et al., APL 68 (1996) 797)と InGaAs 量子井戸(A. Tackeuchi et al., APL 70 (1997) 1131, S. Akasaka et al., APL 85 (2004) 2083)、さらに GaN (T. Kuroda et al., APL 85 (2004) 3116)のスピン偏極ならびに緩和メカニズムを研究してきた。量子ドット構造のスピン緩和過程の解明にも取り組み、量子ドット間のキャリアのトンネル時間の実測(A. Tackeuchi et al., PR. B, 62 (2000)

1568)、スピン偏極したキャリアのトンネル時間の実測(A. Tackeuchi et al., Physica E, 10 (2001) 32)、さらに高均一量子ドットのスピン緩和時間の実測(A. Tackeuchi et al., APL 84 (2004) 3576)、などに意欲的に取り組んできた。特に縦方向に結合した量子ドットでは反強磁性結合が生じる過程を時間分解計測によって観測し(A. Tackeuchi et al., JJAP, 42 (2003) 4278)、2004 年の応用物理学会論文賞 JJAP 論文賞を受賞した。この研究では、分子線ビームエピタキシー(MBE)成長により縦方向に量子力学的に結合した InAlAs/InAs 半導体量子ドットの作製に成功し、加えて高い時間分解測定技術により、円偏光により生成されたスピンが InAs 量子ド

ットでは 80ps 前後で反転する過程を 10 K で実測した。さらに InAlAs 量子ドットのスピンとの間の反強磁性秩序が 50-80 K 以下の温度で存在することを明らかにした。人工的なナノ構造で、交換相互作用によるスピンの反転が可能になったことは、今後のスピンの応用可能性を広げるものと期待できる。交換相互作用の大きさは、ドット間の距離を小さくするほど大きくなるので、ナノ構造の作製技術の向上によって室温での観測ならびに応用が予想される。

## 2. 研究の目的

本研究は、量子ドットに閉じ込めた電子スピンを用いた量子コンピューティングの実現をめざし、これに不可欠のドット間の交換相互作用によるスピンの制御を目的とする。この実現には、結合していないドット内のスピンの振る舞いの解明が不可欠である。本研究では、各エネルギー準位が明瞭に分離される高均一量子ドットを用いることにより、ドット内の純粋なスピン情報が抽出できるといった利点がある。したがってドット内のスピンの振る舞いを解明し、スピンのコヒーレンス時間を伸長することを並行した研究目的とする。また、円偏光の照射によってドット中にスピンのそろった電子を生成させる。この電子スピンを使って隣接する別のドットのスピンを操ることが課題である。

## 3. 研究の方法

本研究の特色は、結合した量子ドット間の交換相互作用やトンネル過程など今後量子コンピューティングに不可欠の素過程の解明を試みられること、また、極めて高均一の量子ドットを用いることによって、純粋な物理現象の解明が期待できることである。従来の量子ドットでは、多数のドットの大きさが均一ではないため、量子化エネルギーが異なるという欠点があったが、電通大の山口浩一助教授らは、極めて高均一の量子ドットの成長条件を見いだした。高均一量子ドットでは、各エネルギー準位からの発光スペクトルがきれいに分離されるため、単一ドットに近い物性情報を光学的な時間分解計測によって得られるという利点がある。量子ドットにおけるスピン緩和メカニズムとしては、量子ドットの 0 次元構造により抑制が予想される Dyakonov-Perel (DP) 効果の他に、キャリア濃度依存性を持つ Bir-Aronov-Pikus (BAP) 効果や温度依存性を持つ Elliott-Yafet (EY) 効果がある。スピンの振る舞いの観測では、超短光パルスの円偏光による光励起によってスピン偏極したキャリアを生成し、その発光の円偏光成分をストリークカメラを用いて観測する。スピン緩和メカニズムが解明されその制御性が明らかに

なれば、より一層のコヒーレンス時間の伸長が期待できる。

## 4. 研究成果

(1) 2006 年度に、高均一量子ドットの基底準位から第二励起準位にいたる各準位のスピン偏極率を時間分解フォトルミネセンス(PL)法によって調べた。サンプルは GaAs 層で埋め込んだ高均一量子ドット (PL 半値幅: 19 meV) である。実験では、チタンサファイアレーザを光源とする円偏光パルスを用いてスピン偏極キャリアを GaAs 層に光励起し、ドット中に緩和したキャリアの PL をストリークカメラによって時間分解測定した。キャリアスピンの向きは PL の円偏光から判別した。その結果、5 mW 励起での第二励起準位(1050-1070 nm)の PL では、スピン偏極率の初期値が 45%という非常に大きな値を有していることがわかった。この高いスピン偏極率のために、スピン偏極の緩和は 160 ps と比較的高速であるものの、発光強度の時間積分値から求めたスピン偏極率は 24%という大きな値が得られた。他の準位のスピン偏極率は、基底準位(1170-1190 nm)では 1 mW 励起において 11%、第一励起準位(1108-1128 nm)では 3 mW 励起において 12%、第三励起準位(980-1000 nm)では 15 mW 励起において約 26%という値が得られた。高いエネルギー準位ほど、スピン偏極率が大きくなるのはスピンパウリブロッキングに起因すると考えられる。

2007 年度は、高均一量子ドットの励起準位で高いスピン偏極率が得られるメカニズムの解明に取り組んだ。高いスピン偏極率の原因としてはスピンパウリブロッキングを想定し、この効果を含んだレート方程式を用いて解析を行い、良い一致を得た。

(2) スピンの応用可能な材料系の探索のために、六方晶 GaN のアクセプタ束縛励起子のスピン緩和時間をポンプ・プローブ法によって調べた。その結果、50K 以下では 1.5 ps 前後の極めて高速のスピン緩和時間を示すことが明らかになった。

(3) ホットキャリアの緩和過程のスピン緩和への影響を調べるために、第三高調波発生器によるポンプ・プローブ測定系を開発した。これを用いて InGaN のホットキャリアの緩和時間を測定し、緩和時間が 15K で、0.9ps と極めて高速であることを明らかにした。

(4) 新しい半導体材料である GaInNAs のスピン緩和時間を測定し、局在励起子と非局在励起子で、スピン緩和時間が 2 ns と 192 ps と一桁違うことを明らかにした。

(5) 結合した量子系でのスピンの振る舞いを調べるために、2008 年度に、縦方向に柱状に積層したコラムナ量子ドットのスピン緩和と、狭い井戸と広い井戸が量子力学的

に結合した結合量子井戸のスピンの緩和を調べた。コラムナ量子ドットは、GaAs (001) 基板上に MBE 法で、1.8 ML の InAs 量子ドットを成長し、その上に GaAs 層 (3 ML) と InAs 層 (0.62 ML) を交互に 3, 20, 35 周期成長させて作製した。コラムの直径は 30 nm - 40 nm である。スピン依存時間分解フォトルミネセンス (PL) 測定を行い、ドット中に緩和したキャリアの発光をストリークカメラによって時間分解測定した。測定系の時間分解能は 15 ps である。35 周期積層したコラムナ量子ドットのスピン緩和時間は単一指数関数近似により 5.3 ns となった。20 周期積層のコラムナ量子ドットと、3 周期積層のコラムナ量子ドットでは、スピン緩和時間はそれぞれ 3.4 ns と 1.6 ns が得られた。このことから、ドットの積層数が増えるとスピン緩和時間が長くなることが明らかになった。ドットの積層数が増えると電子とホールとの波動関数が空間的にずれる可能性があり、これが交換相互作用によるスピン緩和メカニズムである Bir-Aronov-Pikus 効果に影響を及ぼしていると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. Takehiko Umi, Hidetaka Noshio, Shulong Lu, Lianhe Li, Andrea Fiore, Atsushi Tackeuchi, "Spin Relaxation in InAs Columnar Quantum Dots", Japanese Journal of Applied Physics 48, 04C199 2009, 査読有り。

2. K. Kusunoki, N. Tsukiji, T. Umi, A. Tackeuchi, K. Yamaguchi, "Generation of highly circularly polarized light from uniform InAs/GaAs quantum dots", physica status solidi (c), 5, pp.378-381, 2008, 査読有り。

3. T. Fujita, T. Toizumi, Y. Nakazato, A. Tackeuchi, T. Chinone, J. H. Liang, M. Kajikawa, "Competition between quantum-confined Stark effect and free-carrier screening effect in AlGaIn/GaN multiple quantum wells", physica status solidi (c) 5, pp.356-359, 2008, 査読有り。

4. S. L. Lu, T. Ushiyama, A. Tackeuchi, S. Muto, "Carrier spin relaxation in undoped GaAs double quantum wells", physica status solidi (c), 5, pp.326-329, 2008, 査読有り。

5. T. Ushiyama, T. Toizumi, Y. Nakazato, A. Tackeuchi, "Energy relaxation time of hot

carriers photoexcited in InGaIn", physica status solidi (c) 5, pp.143-145, 2008, 査読有り。

6. S. L. Lu, T. Ushiyama, A. Tackeuchi, S. Muto, "Carrier density dependence of nonresonant carrier tunneling in GaAs double quantum wells - effect of exciton and free carrier thermodynamic", physica status solidi (c) 5, pp.78-81, 2008, 査読有り。

7. Shulong Lu, Takafumi Ushiyama, Taisuke Fujita, Koji Kusunoki, Atsushi Tackeuchi, and Shunichi Muto, "Transition from Excitonic Tunneling to Free Carrier Tunneling in GaAs/AlGaAs Double Quantum Wells", Jpn. J. Appl. Phys. 46, pp.3305-3308, 2007, 査読有り。

8. A. Tackeuchi, H. Otake, T. Fujita, T. Kuroda, T. Chinone, J.-H. Liang, M. Kajikawa, "Picosecond spin relaxations of acceptor-bound exciton and A-band free exciton in wurtzite GaN", physica status solidi (c) 3, pp.4303-4306, 2007, 査読有り。

9. H. Otake, T. Kuroda, T. Fujita, T. Ushiyama, A. Tackeuchi, T. Chinone, J.-H. Liang, M. Kajikawa, "Picosecond spin relaxation of acceptor-bound exciton in wurtzite GaN", Applied Physics Letters, 89, 182110, 2006, 査読有り。

10. Atsushi Tackeuchi, Shogo Miyata, Seiji Sugawa, Koji Kusunoki, Tae Whan Kim and Jae-Ho Kim, Hong Seok Lee, Hong Lee Park, "Thermally activated carrier transfer among CdTe/ZnTe self-organized quantum dots", Applied Physics Letters, 89, 112125, 2006, 査読有り。

〔学会発表〕(計 39 件)

1. 和泉壮太郎, 佐伯 悠, 中里嘉昭, 貫井貴夫, 竹内 淳, D. H. Kim, Tae Whan Kim, 「バルク ZnO のスピン緩和」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZK-4, 筑波大学, 2009 年 3 月 30 日。

2. 佐伯 悠, 中里嘉昭, 和泉壮太郎, 貫井貴夫, 竹内 淳, Jae Hun Jung, J. H. You, Tae Whan Kim, Young-Ho Kim, 「有機層中の ZnO ナノ粒子の時間分解フォトルミネセンス」第 56 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZK-3, 筑波大学, 2009 年 3 月 30 日。

3. 貫井貴夫, 藤田泰介, 中里嘉昭, 佐伯 悠,

和泉壮太郎, 竹内 淳, Yoo C.H., Kim T.W., Kwon Y.H., Ryu S.Y., Kang T.W., 「GaN nanowiresの時間分解フォトルミネッセンス測定」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZJ-7, 筑波大学, 2009 年 3 月 31 日.

4. 納所秀宇, 宇美武彦, 浅見健志, 岡本隆仁, Shulong Lu, Lifeng Bian, Zhichuan Niu, 竹内 淳, 「GaNAs/GaAs量子井戸における励起子のスピン緩和の強度依存性」第 56 回応用物理学関係連合講演会, 30p-ZB-7, 筑波大学, 2009 年 3 月 30 日.

5. 佐伯 悠, 中里嘉昭, 和泉壮太郎, 貫井貴夫, 竹内 淳, 武藤俊一, 「GaAs/AlGaAs二重量子井戸のスピン緩和」, 第13回 半導体スピン工学の基礎と応用, 東北大学, 2009年1月27, 28日.

6. 納所秀宇, 宇美武彦, Shulong Lu, Lianhe Li, Andrea Fiore, 竹内 淳, 「InAs コラムナ量子ドットのスピン緩和」, 第13回 半導体スピン工学の基礎と応用, 東北大学, 2009年1月27, 28日.

7. S. Izumi, Y. Saeki, Y. Nakazato, T. Nukui, A. Tackeuchi, D. H. Kim, and T. W. Kim, "Spin Relaxation in bulk ZnO", 第13回 半導体スピン工学の基礎と応用, 東北大学, 2009年1月27, 28日.

8. T. Umi, H. Noshio, T. Asami, S. Lu, L. Li, A. Fiore, A. Tackeuchi, "Spin Relaxation in InAs Columnar Quantum Dots", 2008 International Conference on Solid State Devices and Materials, P-12-7L, Tsukuba, Japan, September 23-26, 2008.

9. 中里嘉昭, 和泉壮太郎, 藤田泰介, 戸泉智勝, 松永 康, 竹内 淳, 千野根崇子, 梁 吉鎬, 梶川政隆, 「AlGaIn/GaN 多重量子井戸の分光学的評価 (2)」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 28p-B-19, 日本大学, 2008 年 3 月 27 - 30 日.

10. Shulong Lu, 上杉征志, 納所秀宇, 竹内 淳, Lifeng Bian, Zhichuan Niu, 「GaNAs/GaAs量子井戸の発光特性」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会 29p-ZT-19, 日本大学, 2008 年 3 月 29 日.

11. Shulong Lu, 納所秀宇, 上杉征志, 竹内 淳, Lifeng Bian, Zhichuan Niu, 「GaNAs/GaAs量子井戸における励起子のスピン緩和現象」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 29a-E-9, 日本大学, 2008 年 3 月 29 日.

12. 宇美武彦, Lianhe Li, 納所秀宇, 赤坂義則, 楠 紘慈, Shulong Lu, 竹内 淳, 「InAs コラムナ量子ドットの高スピン緩和」, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 28p-E-7, 日本大学, 2008 年 3 月 28 日.

13. 宇美武彦, Lianhe Li, 納所秀宇, 浅見健志, Shulong Lu, 竹内 淳, 「InAs コラムナ量子ドットにおけるスピン緩和時間の励起光強度依存性」, 第 69 回応用物理学学会, 4p-ZQ-7, 中部大学, 2008 年 9 月 4 日.

14. 佐伯 悠, 牛山隆文, 中里嘉昭, 和泉壮太郎, 竹内 淳, Jae Hun Jung, Fushan Li, Tae Whan Kim, Young-Ho Kim, 「ZnO ナノ粒子の発光のシュタルク効果とキャリアによるスクリーニング効果」, 第 69 回応用物理学学会, 3a-N-11, 中部大学, 2008 年 9 月 3 日.

15. 納所秀宇, 浅見健志, 宇美武彦, Shulong Lu, Zhichuan Niu, 竹内 淳, 「高In組成 InGaAs/GaAs量子井戸のスピン緩和」, 第 69 回応用物理学学会, 3p-ZQ-3, 中部大学, 2008 年 9 月 3 日.

16. Atsushi Tackeuchi, "Time resolved studies of carrier and spin dynamics in quantum dots and wide band-gap materials", 14th International symposium on the physics of semiconductors and applications, SCS-I-01, August 26-29, 2008, Jeju, Korea.(招待講演)

17. Atsushi Tackeuchi, Hirotaka Otake, Taisuke Fujita, Takako Chinone, Ji-Hao Liang, Masataka Kajikawa, Fumiyoshi Takano, Hiro Akinaga, "Picosecond Excitonic Spin Relaxation in Hexagonal GaN and Nanosecond Excitonic Spin Relaxation in Cubic GaN", 7th International Conference of Nitride Semiconductors, WP87, September 16-21, 2007, Las Vegas, USA.

18. 楠 紘慈, 築地伸和, 宇美武彦, 山口浩一, 竹内 淳, 「高均一InAs量子ドットの高スピン偏極発光:スピンパウリブロッキングを含むレート方程式解析」, 第 68 回応用物理学学会, 6a-S-8, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 6 日.

19. 中里嘉昭, 藤田泰介, 戸泉智勝, 竹内 淳, 千野根崇子, 梁 吉鎬, 梶川政隆, 「AlGaIn/GaN 多重量子井戸の分光学的評価」, 第 68 回応用物理学学会, 6a-ZR-4, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 6 日.

20. 宇美武彦, 築地伸和, 楠 紘慈, 山口浩一, 竹内 淳, 「高均-InAs/GaAs量子ドットの第二励起準位のスピン緩和」, 第 68 回応用物理学会, 6a-N-2, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 6 日.
21. 陸書龍, 牛山隆文, 竹内 淳, 武藤俊一, 「結合量子井戸のキャリアスピン緩和」, 第 68 回応用物理学会, 6a-N-23, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 6 日.
22. 牛山隆文, 佐伯 悠, 戸泉智勝, 中里嘉昭, 藤田泰介, 陸 書龍, 竹内 淳, 「InGaN に光励起されたホットキャリアの緩和過程の観測II」, 第 68 回応用物理学会, 5a-ZR-1, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 5 日.
23. S. Lu, T. Ushiyama, A. Tackeuchi, S. Muto, "Carrier Density Dependence of Nonresonant Carrier Tunneling in GaAs/AlGaAs Double Quantum Well effect of Exciton and Free Carrier Thermodynamic", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, MoP-13, July 23-27, 2007.
24. K. Kusunoki, T. Umi, A. Tackeuchi, N. Tsukiji, K. Yamaguchi, "Generation of Highly Circularly Polarized Light from Uniform InAs/GaAs Quantum Dots", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, MoP-38, July 23-27, 2007.
25. T. Ushiyama, T. Toizumi, Y. Nakazato, A. Tackeuchi, "Energy Relaxation Time of Hot Carriers Photoexcited in InGaN", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, TuP-26, July 23-27, 2007.
26. S. Lu, T. Ushiyama, A. Tackeuchi, S. Muto, "Carrier Spin Relaxation in Undoped GaAs/AlGaAs Double Quantum Wells", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, TuP-36, July 23-27, 2007.
27. T. Fujita, T. Toizumi, Y. Nakazato, A. Tackeuchi, T. Chinone, J.H. Liang, M. Kajikawa, "Competition between Quantum-Confined Stark Effect and Free Carrier Screening Effect in AlGaIn/GaN Multiple Quantum Well", 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors, WeA-2, July 23-27, 2007.
28. 宇美武彦, 築地伸和, 楠 紘慈, 山口浩一, 竹内 淳, 「高均-InAs/GaAs量子ドットによる高スピン偏極円偏光の発生」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZS-10, 青山学院大学, 2007 年 3 月 30 日.
29. 陸 書龍, 牛山隆文, 藤田泰介, 楠 紘慈, 竹内 淳, 武藤俊一, 「結合量子井戸のトンネル時間のキャリア濃度依存性」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 29a-T-1, 青山学院大学, 2007 年 3 月 29 日.
30. 楠 紘慈, 築地伸和, 宇美武彦, 山口浩一, 竹内 淳, 「高均-InAs/GaAs量子ドットによる高スピン偏極円偏光の時間分解測定」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 29a-T-4, 青山学院大学, 2007 年 3 月 29 日.
31. 中里嘉昭, 藤田泰介, 戸泉智勝, 竹内 淳, 千野根崇子, 梁 吉鎬, 梶川政隆, 「AlGaIn/GaN MQWの発光のシュタルク効果とキャリアによるスクリーニング効果-励起光強度依存性のフィッティング-」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZM-8, 青山学院大学, 2007 年 3 月 28 日.
32. 牛山隆文, 戸泉智勝, 中里嘉昭, 竹内 淳, 「InGaNに光励起されたホットキャリアの緩和過程の観測」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZM-11, 青山学院大学, 2007 年 3 月 28 日.
33. 藤田泰介, 戸泉智勝, 中里嘉昭, 竹内 淳, 千野根崇子, 梁 吉鎬, 梶川政隆, 「AlGaIn/GaN MQWの発光のシュタルク効果とキャリアによるスクリーニング効果-PL時間分解測定-」, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 28p-ZM-7, 青山学院大学, 2007 年 3 月 28 日.
34. 陸 書龍, 牛山隆文, 藤田泰介, 楠 紘慈, 竹内 淳, 「GaAs/AlGaAs結合量子井戸のトンネル時間の温度依存性」, 第 67 回応用物理学会, 31a-RE-9, 立命館大学, 2006 年 8 月 31 日.
35. 楠 紘慈, 宮田匠悟, 素川靖司, 竹内 淳, Kim T. W., Kim J. H., Lee H. S., Park H. L., 「CdTe/ZnTe量子ドット中の熱活性キャリア移動」, 第 67 回応用物理学会, 31p-RE-4, 立命館大学, 2006 年 8 月 31 日.
36. 藤田泰介, 大嶽浩隆, 中島壮人, 竹内 淳, 「六方晶GaInN中アクセプタ束縛励起子のス

ピン緩和時間の温度依存性」,第 67 回応用物理学会,30p-C-1,立命館大学,2006 年 8 月 30 日.

37. 牛山隆文,藤田泰介,陸書龍,竹内 淳,  
「InGaNに光励起されたホットキャリアの緩和過程」,第 67 回応用物理学会,30p-C-2,立命館大学,2006 年 8 月 30 日.

38. Atsushi Tackeuchi, Hirotaka Otake, Yusuke Ogawa, Takafumi Ushiyama, Taisuke Fujita, Fumiyoshi Takano, Hiro Akinaga, "Nanosecond excitonic spin relaxation in cubic GaN", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006.

39. Hirotaka Otake, Takamasa Kuroda, Atsushi Tackeuchi, Kazuyoshi Taniguchi, Takako Chinone, Ji-Hao Liang, Masataka Kajikawa, Naohika Horio, "Picosecond spin relaxation of acceptor-bound exciton in Wurtzite GaN", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006.

#### 6 . 研究組織

##### (1)研究代表者

竹内 淳 (TAKEUCHI ATSUSHI)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号:80298140

##### (2)研究分担者

無し

##### (3)連携研究者

無し