

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 7日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360032

研究課題名（和文）円偏光光源のための高偏極長寿命スピン緩和量子ドット

研究課題名（英文） Highly spin polarized quantum dots with long spin relaxation time for future circularly polarized light emitting diodes

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（和文）：本研究は、1.3 ミクロン帯または可視光域で円偏光光源に応用可能な半導体の探索を目的とした。波長 1 ミクロンより長波側の発光では、InAs コラムナー量子ドットが、波長 1.06 ミクロンで 3.42 ns の長いスピン緩和を示すことを明らかにし、また、InAs 高均一量子ドットが、面内異方性により基底準位から第二励起準位までいずれも安定な楕円偏光を示すことを初めて明らかにした。可視光域では、Ge 基板上的高 Si ドープ GaInP のドナーアクセプタ対の発光（687nm）のスピン緩和が 210 ns と既報告の中で最も長いものの一つであることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For the realization of the circularly polarized light emitting diode, spin polarizations and spin relaxation times of some III-V compound semiconductors were investigated. InAs columnar quantum dots showed 3.42 ns-spin relaxation at 1.06 micron meter. The highly uniform InAs quantum dots exhibited the stable elliptical polarization caused by the in-plane anisotropies of the dot shape and strain distribution. Highly Si doped GaInP showed 210 ns-spin relaxation which is one of the longest spin relaxations ever observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2011 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2012 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：光制御, スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

半導体中のキャリアを円偏光によって光励起すると、そのスピンを揃えられる。こ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。本研究の代表者は 1990 年から、いち早くこの現象の解明に取り組み(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)、さらに GaN (T. Kuroda et al., APL 85 (2004) 3116)等のスピン緩和過程を研究してきた。研究代表者らによる数多くの測定結果によると、閃亜鉛鉱(Zinc-blend)

構造の半導体では、バンドギャップが大きくなるほどスピン緩和時間が遅くなるという明瞭な傾向が出ている。研究代表者らの研究により、閃亜鉛鋅型半導体では、スピン軌道相互作用が関与する D'yakonov-Perel 効果と呼ばれるスピン緩和機構が大きな影響力を持つことが明らかになっている。スピン軌道相互作用はバンドギャップが小さくなると大きくなることから、この依存性は D'yakonov-Perel 効果によって説明できる（ウルツァイト GaN は異なる）。

この関係をもとに応用領域を考えると、光通信の主要な波長である 1.3 ミクロンに近い波長で InAs 量子ドット(Q.Dot)が 1 ns という遅いスピン緩和時間を示していることから最も実用に近い材料系であると言える。円偏光光源の活性層としては高いスピン偏極を持ちスピン緩和時間が長い材料がふさわしい。同じバンドギャップエネルギーでは、量子ドット構造やバルクの方が量子井戸(QW)構造よりスピン緩和時間が遅くなるという傾向が実験的に得られている。

ただし、波長 400-700 nm の可視光領域では、スピン緩和時間が測定されていない未踏領域が存在する。この波長領域の開拓は円偏光光源の開発とスピントロニクスの方において重要である。本研究は以上の観点から、最も実用に近い波長 1.3 ミクロン帯と未踏領域である可視光域の二つの波長域での円偏光光源用半導体の開発を目的とする。近年、スピントロニクス分野の進歩は日進月歩であり、一つの波長域の材料系の研究開発にとどまらず複数の材料系を並行して研究する必要がある。

波長 1.3 ミクロン近傍では、InAs 量子ドットが 1ns の遅い緩和時間を示しているが、これは電通大・山口浩一教授による高均一量子ドットを研究代表者らが調べたもので、この第二準位からの発光では、45%もの高いスピン偏極が得られている(K. Kusunoki et al., *physica status solidi (c)*, 5, 378 (2008))。また、長い緩和時間という点では、ローザンヌ工科大の Dr. Lianhe Li らによる縦方向に量子ドットが積層してコラム状(柱状)になったコラムナ量子ドットを研究代表者らが調べた結果、波長 1.1 μm で 5.3 ns という極めて長いスピン緩和時間が得られた(T. Umi et al., *JJAP* 48, 04C199 (2009))。したがって、高いスピン偏極と長いスピン緩和時間という両者の特徴をあわせ持つ半導体量子ドット構造を開発できれば、理想的なスピン偏極光源になりうると考えられる。

2. 研究の目的

量子ドットを発光ダイオードや半導体レーザーの活性層として用いれば、量子ドット固有の高いスピン偏極率と長いスピン緩和

時間によって、優れた円偏光光源になると大いに期待できる。

本研究は、応用上重要な光通信の波長 1.3 ミクロン帯とスピン物性の未踏領域である可視光域(400-700nm)の二つの波長領域で、高いスピン偏極による円偏光発光を可能とする量子ドット構造を探索し、そのスピン物性を解明する。さらに、得られた知見をもとに、望ましい円偏光光源を新たに創成する。

3. 研究の方法

光通信の波長帯である 1.3 ミクロン帯と人間の眼に感度のある可視光領域で高いスピン偏極と長いスピン緩和時間を有し、円偏光光源(発光ダイオード、半導体レーザー等)の活性層となりうる半導体材料を探索し開発する。1.3 ミクロン帯は研究代表者らによるこれまでの研究により、最も実用可能性の高いスピン偏極発光材料が存在する領域であると考えられる。

具体的な半導体材料としては、1.3 ミクロン帯では高いスピン偏極率を持つ InAs 高均一量子ドットと、5ns もの長いスピン緩和時間を持つ InAs コラムナ量子ドットを基本に、その発展型の材料系とその量子構造を創成する。また、400-700 nm の可視光域では、CdTe 量子ドットを主な対象として、そのスピン緩和過程を解明し、最適の量子ドット構造を得る指針を明らかにする。この課題の実現のためには、ドット内のスピンの振る舞いの解明が不可欠であり、超高速現象の応答の解明において、研究代表者らがこれまで十二分に実績をつんできた時間分解測定技術と材料物性研究の経験を活用する。

4. 研究成果

2010年度は、スピン偏極発光ダイオードの活性層への応用を目指して量子ドットのキャリアスピン緩和過程を調べた。これまで研究代表者らは、量子ドットのスピン偏極の大きさやスピン緩和時間を測定するために、円偏光を利用したフォトルミネッセンス測定を行ってきた。しかし、フォトルミネッセンス測定では、量子ドットの埋め込み層である GaAs 層に円偏光で電子を光励起し、量子ドット中にエネルギー緩和した電子のスピン偏極やスピン緩和時間を測定する。このため、エネルギー緩和中にスピンの偏極率が下がるという欠点があった。本研究ではさらに直接的にスピンの情報を引き出すために、ポンプ・プローブ法を用い、InAs 高均一量子ドットの中に電子を直接光励起し、そのスピン緩和過程を観測した。その結果 15K で 1.7ns という遅いスピン緩和時間を持つことが明らかになった。波長 1 ミクロンより長波長ではストリークカメラの感度が大きく低下するので、波長 1.3 ミクロンより長波長の発光を

持つ量子ドットのスピン緩和の測定は困難であった。ポンプ・プローブ法による量子ドットのスピン緩和の観測が可能になったことによって、波長 1.3 ミクロンより長波長のバンドギャップを持つ量子ドットの測定も可能になった。この測定上の意義は大きい。

2010 年度にはまた、スピン偏極発光ダイオードの活性層になりうる可能性のある半導体材料として、PVK または PMMA 層に埋め込まれた CdTe ナノ粒子、GaInNAs/GaAs 多重量子井戸、Ge 基板上的 InGaAs バルク、コラムナ量子ドットなどの発光特性やスピン緩和時間も測定した。

2011 年度は、InAs コラムナ量子ドットのスピン緩和時間を円偏光時間分解フォトルミネッセンス測定によって調べた。サンプルは、InAs を 1.8 原子層積層しシード（種）ドットを形成したのち、量子ドットを 3 層積層したもの、35 層積層したものの二種類である。3 層積層したコラムナ量子ドットは、50K 以下では速いスピン緩和と遅いスピン緩和の二成分を持ち、100K と 150K では単一指数関数で近似できた。また、35 層積層のコラムナ量子ドットでは、10–140K で二成分のスピン緩和を持っていた。遅いスピン緩和は、10K で 3.42 ns (波長 1.06 ミクロン) から 130 K で 0.849 ns と大きく変化したが、通常の量子ドットと同じく音響フォノン散乱を考慮する Elliott-Yafet 効果で近似可能であることがわかった。速いスピン緩和は 100 ps 程度と高速であり、温度依存性を持たないことが明らかになった。このことから、速い緩和は Bir-Aronov-Pikus 効果が支配的であることが明らかになった。円偏光フォトダイオードへの応用においては、長いスピン緩和時間が望ましいため、この遅いスピン緩和の成分を大きくする方法を探索する必要がある。2011 年度はまた、高均一量子ドットのスピン緩和過程をポンプ・プローブ法による時間分解測定によって観測した。その結果、量子ビートが観測されることが明らかになった。これは量子ドットの面内異方性に起因するものと考えられ、量子ドットが高均一であるため、多数の量子ドット集団を観測したにもかかわらず、量子ビートの観測が可能になったものと考えられる。

2012 年度は、基底準位のフォトルミネッセンス半値幅が 21meV と非常に狭い高均一量子ドットの面内異方性をフォトルミネッセンス測定で調べた。その結果、基底準位 (10K で波長 1.18 ミクロン)、第一励起準位、第二励起準位において、いずれも楕円偏光となっていることが明らかになった。これは量子ドットの面内異方性に起因するものと考えられる。これらの直線偏光度は基底準位が最も大きく、次いで第一励起準位、第二励起準位と小さくなることが明らかになった。また、

時間分解フォトルミネッセンス計測により、これらの直線偏光度が計測時間範囲内 (数ナノ秒) で極めて安定であることも分かった。量子ドットの励起準位での面内異方性が観測されたのはこれが初めてであり、円偏光発光ダイオードの活性層に量子ドットを用いる際の偏光特性に関する重要な知見が得られた。

可視光領域での活性層の候補として、Ge 基板上に成長した高 Si ドープ GaInP のスピン緩和過程を調べた。サンプルは <111> 面から 9 度傾けた Ge 基板上に Si ドープした ($2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) Ga_{0.495}In_{0.505}P を MOCVD 法によって成長した。10K では、波長 687nm 付近にドナーアクセプタ対によるフォトルミネッセンスが観測され、波長 654nm にバンド間遷移のフォトルミネッセンスが観測された。円偏光時間分解フォトルミネッセンス計測では、波長 654nm のフォトルミネッセンスにスピン偏極は観測されなかったが、波長 687nm のフォトルミネッセンスでは明瞭なスピン偏極が観測され (光励起直後で 7%)、そのスピン緩和時間が 210ns と極めて長いことが明らかになった。このスピン緩和時間は、これまでに報告された III-V 族化合物半導体のスピン緩和時間の中では最も長いものの一つであり、円偏光発光ダイオードへの応用の高いポテンシャルを示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. M. Uemura, J. Ohta, R. Yamaguchi, K. Yamaguchi, A. Tackeuchi, "Observation of optical anisotropy of highly uniform InAs quantum dots", 査読有 Journal of Crystal Growth (2013) in press. DOI:10.1016/j.jcrysgro.2012.12.102

2. Ryo Yamaguchi, Shinichiro Gozu, Teruo Mozume, Yoshitsugu Oyanagi, Mitsunori Uemura, Atsushi Tackeuchi, "Picoseconds Carrier Spin Relaxation in In_{0.8}Ga_{0.2}As/AlAs/AlAs_{0.56}Sb_{0.44} Coupled Double Quantum Wells", 査読有 Japanese Journal of Applied Physics 52, 04CM05 (2013). DOI:10.7567/JJAP.52.04CM05

3. W. He, S.L. Lu, D.S. Jiang, J.R. Dong, A. Tackeuchi, H. Yang, "Photoluminescence and Raman studies on Ge-based complexes in Si-doped GaInP epilayers grown on Germanium", 査読有 Journal of Applied Physics, 112, 023509(2012). DOI:10.1063/1.4737611

4. Takenori Ushimi, Hiromi Nakata, Toshihiro Ishizuka, Kazutoshi Sasayama, Shulong Lu, Jianrong Dong, and Atsushi Tackeuchi,

"Exciton and carrier spin relaxations in InGaAs lattice-matched to off-cut Ge substrates", 査読有

Applied Physics Letters, 100, 252414 (2012).

DOI:10.1063/1.4730386

5. Sota Nakanishi, Kazutoshi Sasayama, Yoshitsugu Oyanagi, Ryo Yamaguchi, Shulong Lu, Lianhe Li, Andrea Fiore, and Atsushi Tackeuchi,

"Temperature Dependence of Spin Relaxation Time in InAs Columnar Quantum Dots at 10 to 150K", 査読有
Japanese Journal of Applied Physics, 51, 04DM05 (2012).

DOI:10.1143/JJAP.51.04DM05

6. K. Sasayama, S. Nakanishi, R. Yamaguchi, Y. Oyanagi, T. Ushimi, S. Gozu, T. Mozume, and A. Tackeuchi,

"Exciton spin relaxation in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ quantum wells", 査読有

Applied Physics Letters, 100, 092401 (2012).

DOI:10.1063/1.3690833

7. T. Asami, H. Noshu, L.H. Li, J.C. Harmand, S.L. Lu, A. Tackeuchi,

"Carrier spin relaxation in GaInNAsSb/GaNAsSb/GaAs quantum well", 査読有

AIP Conference Proceedings, 1399, pp.665-666 (2011).

DOI:10.1063/1.3666552

8. T. Nukui, S. Gozu, T. Mozume, S. Izumi, Y. Saeki, A. Tackeuchi,

"Carrier spin relaxation in InGaAs/AlAsSb quantum wells", 査読有

AIP Conference Proceedings, 1399, pp.659-660 (2011).

DOI:10.1063/1.3666549

[学会発表] (計 33 件)

1. 浅香尚洋, 石塚俊裕, S. L. Lu, 竹内 淳,

「Be ドープ p 型 GaAs のスピン緩和の観測 (10-100 K)」,

第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 28p-A8-5 (2013 年 3 月 27 日-30 日, 神奈川工科大学) .

2. 上村 光典, 本多 一輝, 山口 亮, S. L. Lu, 竹内 淳,

「低温成長 GaAs の 10K におけるスピン緩和の観測」,

第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 28p-A8-4 (2013 年 3 月 27 日-30 日, 神奈川工科大学) .

3. T. Ishizuka, T. Ushimi, H. Nakata, S. L. Lu, J. R. Dong and A. Tackeuchi,

"210-ns-long Spin Relaxation of Heavily Si-doped GaInP lattice-matched to Ge Substrates",

2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-12-4 (September 25-27, 2012, Kyoto, Japan).

4. Ryo Yamaguchi, Shinichiro Gozu, Teruo Mozume, Yoshitsugu Oyanagi, Mitsunori Uemura, Atsushi Tackeuchi,

"Picoseconds Carrier Spin Relaxation in $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ Coupled Double Quantum Wells",

2012 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-12-11 (September 25-27, 2012, Kyoto).

5. M. Uemura, J. Ohta, R. Yamaguchi, K. Yamaguchi, A. Tackeuchi,

"Observation of optical anisotropy of highly uniform InAs quantum dots",

The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, LN-ThP-66 (September 23-28, 2012, Nara)

6. 山口 亮, 牛頭信一郎, 物集照夫, 小柳慶継, 上村光典, 竹内 淳,

「 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 結合量子井戸のスピン緩和時間の温度依存性」

2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, 11a-F1-9 (2012 年 9 月 11-14 日, 愛媛大学).

7. 上村光典, 太田 潤, 山口 亮, 山口浩一, 竹内 淳,

「単層高均一 InAs 量子ドットの面内異方性の観測」

2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, 11a-F1-11 (2012 年 9 月 11-14 日, 愛媛大学).

8. 石塚俊裕, 浅香尚洋, 牛頭信一郎, 物集照夫, 竹内 淳,

「 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 多重量子井戸の室温におけるスピン緩和の観測」,

2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演

会, 14a-H6-4 (2012年9月11-14日, 愛媛大学).

9. 浅香尚洋, 石塚俊裕, 牛見健則, S. L. Lu, J. R. Dong, 竹内 淳, 「Ge 基板上に格子整合した InGaAs のピコ秒スピン緩和の観測」, 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 14a-H6-5 (2012年9月11-14日, 愛媛大学).

10. 石塚俊裕, 牛見健則, 中田大海, Shulong Lu, Jianrong Dong, 竹内 淳, 「Ge 基板上高 Si ドープ GaInP のスピン緩和(10-300 K)」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会: 16p-B11-5 (2012年3/15~18 早稲田大学).

11. 笹山和俊, 山口 亮, 中西奏太, 小柳慶継, 武藤俊一, 竹内 淳, 「GaAs/AlGaAs 二重量子井戸のスピン緩和の観測」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18a-E1-4 (2012年3/15~18 早稲田大学).

12. 笹山和俊, 上村光典, 中西奏太, 山口 亮, 小柳慶継, 佐宗麻子, 牛頭信一郎, 物集照夫, 竹内 淳, 「InGaAs/AlAsSb 多重量子井戸の励起子スピン緩和」, 第 59 回応用物理学関係連合講演会: 18a-E1-5 (2012年3/15~18 早稲田大学).

13. 中西奏太, 笹山和俊, 小柳慶継, 山口亮, 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時間の温度依存性 (10~100K)」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), E3, 2011年11月28,29日 (東京工業大学).

14. 牛見健則, 中田大海, 石塚俊裕, S. L. Lu, J. R. Dong, 竹内 淳, 「Ge 基板上に成長させた InGaAs のスピン緩和の観測(10-300 K)」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), P18, 2011年11月28,29日 (東京工業大学).

15. 石塚俊裕, 牛見健則, 中田大海, S. L. Lu, J. R. Dong, 竹内 淳, 「時間分解フォトルミネッセンス測定による Ge 基板上高 Si ドープ GaInP のスピン緩和の観測」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), P19, 2011年11月28,29日 (東京工業大学).

16. 中田大海, 牛見健則, 石塚俊裕, S. L. Lu, L. F. Bian, Z. C. Niu, 竹内 淳, 「GaInNxAs/GaAs 多重量子井戸におけるスピン緩和時間の窒素組成依存性」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), P20, 2011年11月28,29日 (東京工業大学).

17. 笹山和俊, 太田潤, 中西奏太, 小柳慶継, 山口亮, 山口浩一, 竹内 淳, 「単層高均一 InAs 量子ドットのスピン緩和」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), P21, 2011年11月28, 29日 (東京工業大学).

18. 山口亮, 笹山和俊, 中西奏太, 小柳慶継, 牛頭信一郎, 物集照夫, 竹内 淳, 「InGaAs/AlAsSb 多重量子井戸のスピン緩和」, 第 16 回半導体スピン工学の基礎と応用研究会(PASPS-16), P22, 2011年11月28, 29日 (東京工業大学).

19. S. Nakanishi, K. Sasayama, Y. Oyanagi, R. Yamaguchi, S. Lu, L. H. Li, A. Fiore and A. Tackeuchi, "Temperature Dependence of Spin Relaxation Time in InAs Columnar Quantum Dots at 10 to 50 K", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, (September 28-30, 2011, Nagoya, Japan).

20. 山口 亮, Dong-Yeol Yun, Tae-Whan Kim, Sung-Woo Kim, Sang-Wook Kim, 笹山和俊, 中西奏太, 小柳慶継, 竹内 淳, 「PVP または PVK 層に埋め込まれた CdTe ナノ粒子の時間分解フォトルミネッセンス測定」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会 1a-K-8, (2011年8/29~9/2, 山形大学).

21. 牛見健則, 中田大海, 石塚俊裕, Shulong Lu, Jianrong Dong, 竹内 淳, 「Ge 基板上に成長させた InGaAs のスピン緩和の観測(10-300 K)」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 1p-S-2, (2011年8/29~9/2, 山形大学).

22. 石塚俊裕, 牛見健則, 中田大海, Shulong Lu, Jianrong Dong, 竹内 淳, 「時間分解フォトルミネッセンス測定による Ge 基板上高 Si ドープ GaInP のスピン緩和の観測」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 1p-S-3, (2011年8/29~9/2, 山形大学).

23. 中田大海, 牛見健則, 石塚俊裕, Shulong Lu, Bian Lifeng, Zhichuan Niu, 竹内 淳, 「GaInNxAs/GaAs 多重量子井戸におけるスピンの緩和時間の窒素組成依存性 II」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 1p-S-4, (2011 年 8/29~9/2, 山形大学).

24. 中西奏太, 笹山和俊, 小柳慶継, Shulong Lu, Lianhe Li, Andrea Fiore, 竹内 淳, 「InAs コラムナ量子ドットにおけるスピンの緩和時間の温度依存性」, 第 72 回 応用物理学学会学術講演会, 1p-K-5, (2011 年 8/29~9/2, 山形大学).

25. 笹山和俊, 太田 潤, 中西奏太, 小柳慶継, 山口 亮, 山口浩一, 竹内 淳, 「単層高均一 InAs 量子ドットのスピンの緩和時間の温度依存性」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 1p-K-6, (2011 年 8/29~9/2, 山形大学).

26. 小柳慶継, 牛頭信一郎, 物集照夫, 笹山和俊, 中西奏太, 山口 亮, 竹内 淳, 「InGaAs/AlAsSb 多重量子井戸の低温(10K)でのスピンの緩和時間測定」, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 1p-K-7, (2011 年 8/29~9/2, 山形大学).

27. H. Nakata, T. Asami, T. Ushimi, T. Ishizuka, S. L. Lu, Z. C. Niu, and A. Tackeuchi, "Nitrogen concentration dependence of spin relaxation time in GaInNxAs/GaAs quantum wells", 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, WP-87, August 1-5, 2011, Matsue, Japan.

28. K. Sasayama, J. Ohta, S. Nakanishi, K. Yamaguchi, and A. Tackeuchi, "Observation of spin relaxation in single-layer highly uniform InAs quantum dots by time-resolved pump-and-probe measurement", 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, WP-88, August 1-5, 2011, Matsue, Japan.

29. T. Ushimi, T. Asami, H. Nakata, T. Ishizuka, S. L. Lu, J. R. Dong, and A. Tackeuchi, "Observation of spin relaxation in InGaAs grown on germanium substrate", 6th International School and Conference

on Spintronics and Quantum Information Technology, WP-92, August 1-5, 2011, Matsue, Japan.

30. 牛見健則, 浅見健志, 中田大海, Shulong Lu, 竹内 淳, 「時間分解ポンププローブ反射計測による Ge 基板上 InGaAs バルクのスピンの緩和の観測」, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 27a-KM-6, 2011 年 3 月 24 日-27 日(神奈川工科大学).

31. 笹山和俊, 太田 潤, 貫井貴夫, 中西奏太, 山口浩一, 竹内 淳, 「時間分解ポンププローブ反射計測による高均一 InAs 量子ドットのスピンの緩和の観測」, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 25p-KV-11, 2011 年 3 月 24 日-27 日(神奈川工科大学).

32. 中西奏太, Dong-Yeol Yun, Tae-Whan Kim, Sung-Woo Kim, Sang-Wook Kim, 貫井貴夫, 笹山和俊, 竹内 淳, 「PVK または PMMA 層に埋め込まれた CdTe ナノ粒子の時間分解フォトルミネッセンス測定」, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 25p-KV-12, 2011 年 3 月 24 日-27 日(神奈川工科大学).

33. 中田大海, 浅見健志, 牛見健則, Shulong Lu, Bian Lifeng, Zhichuan Niu, 竹内 淳, 「GaInNxAs/GaAs 多重量子井戸におけるスピンの緩和時間の窒素組成依存性」, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 25p-BQ-5, 2011 年 3 月 24 日-27 日(神奈川工科大学).

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