

## 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16日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244044

研究課題名（和文）半導体量子ドットにおける単一電子スピン状態のトモグラフィ測定と任意光制御

研究課題名（英文）Tomography measurement and arbitrary optical control of single electron spin state in semiconductor quantum dot

## 研究代表者

小坂 英男（KOSAKA HIDEO）

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：20361199

研究成果の概要（和文）：光共振器中に埋め込まれた GaAs/AlGaAs 単一量子ドットの中性励起子および荷電励起子の光励起発光スペクトルの磁場依存性測定から、電子と正孔の g 因子を同定し、電子スピン状態の光書き込み、光制御、光トモグラフィ測定に不可欠な V 型三準位構造が実現できることを明らかにした。また、量子井戸においても光書き込みおよび光読み出しの過程が量子的なものであることを示した。さらに、光感受率の虚部を利用した従来のトモグラフィックカー回転に加え、実部を利用したトモグラフィックカー楕円率と呼ぶ新たな手法でスピニコヒーレンスの測定が可能であることを示し、コヒーレントカー効果の一般的概念を構築した。

研究成果の概要（英文）：We clarified that the V-typed three-level energy structure, which allows photonic state transfer, arbitrary optical control and optical tomography measurement of an electron spin state, can be formed by the measurement of g-factor of an electron and a hole estimated from the magnetic-field dependence of optically excited emission spectra of a neutral and charged exciton in a single GaAs/AlGaAs quantum dot embedded in an optical cavity.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	18,900,000	5,670,000	24,570,000
2010年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2011年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度			
年度			
総計	36,200,000	10,860,000	47,060,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性 I

キーワード：スピントロニクス、量子エレクトロニクス、光物性、量子井戸、量子ドット

## 1. 研究開始当初の背景

近年、量子力学の原理を応用した量子情報処理や量子情報通信技術の発展が著しい。これらの技術の基礎となるのが「量子ビット」と呼ばれる、量子力学的性質をもつ粒子である。量子ビットして様々な提案があるが、従

来の古典ビットが半導体中の電子であるように、量子ビットも同じく半導体中の電子であるのが、実装整合性の意味で好ましい。電子には大きく分けて電荷とスピンの自由度があるが、スピンは歴史的に見ても量子の代表であり、電子スピンを量子ビットとして利

用するのが、最も素直な解である。量子のもつ基本的性質として、コヒーレンス（位相保存性）があるが、半導体中の単一電子スピンのコヒーレンスを光によって直接的に任意制御し、直接トモグラフィ測定した例は今までない。本課題研究代表者らは最近、従来の磁気光学カー効果（MOKE）の概念を拡張することで、半導体中に生成された電子スピンのコヒーレンスを、反射光によって直接的に観測することに世界で初めて成功した。従来のスピン測定が固定された量子化軸への射影的な測定であったのに対し、本測定では、光入射方向は基板に垂直な方向に固定しながらも、電子スピンを任意の基底へ射影することができる。このような多面的な射影観測により、電子スピンのコヒーレンス状態をブロッホ球上の状態ベクトル（ブロッホベクトル）として3次元的に再構成する、電子スピントモグラフィ（断層撮影）測定が可能となった。この電子スピントモグラフィ測定は、電子スピンの量子性を把握する手段として不可欠なものである。しかしながら、現状の実験は半導体量子井戸に限られたものであり、いまだ単一電子のスピン状態の観測に成功していない。スピンの量子性は、単一電子の観測により始めて発現するものであり、量子情報技術への応用を考えれば、単一電子スピンのトモグラフィ測定は早急に挑戦すべき課題である

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、本研究課題では、半導体量子ドットにおける単一電子のスピン状態のトモグラフィ測定と任意光制御を始めて実現することを目的とする。これにより、光子による電子スピンの書き込み・操作・読み出しの基本三要素を実現し、量子インターフェースとしての機能を完備する。

## 3. 研究の方法

本課題研究代表者のこれまでの研究により、GaAs 量子井戸中の電子スピンを、任意軸方向に射影することが可能である。これにより、電子スピンの状態トモグラフィ測定が行え、ブロッホ球上における状態ベクトルに関する知見を得ることができる。

本課題初年度は、これらの実績をふまえ、

- (1) GaAs 半導体量子井戸における電子スピンのコヒーレンス状態の高精度な測定。
- (2) 電子スピンの位相緩和に関する知見の取得。
- (3) 量子ドットにおける磁気光学カー回転測定に向けた顕微磁気光学測定系の構築。

に関する研究を行う。

2 年目以降は、初年度に行った量子井戸における TKR 測定を進展させ、量子ドットにおける TKR 測定を行い、偏光による電子スピン状態任意制御を行う。

## 4. 研究成果

本研究課題初年度の研究では、提案時計画の通り、以下の成果を得た。

### (1) GaAs 半導体量子井戸における電子スピンのコヒーレンス状態の高精度な測定

研究代表者は、電子スピンのコヒーレンス状態を直接測定する手法として、従来の磁気光学カー回転測定を進展させたトモグラフィックカー回転（TKR）測定と呼ぶ新しい手法を考案している。通常のカー回転測定では、基板に垂直な方向へのみスピン射影が可能であるが、TKR測定では任意方向へのスピン射影が原理上可能である。しかしながら、現状では基板の面内方向への射影に関しては、絶対値を精度良く評価することができないという課題があった。特に横磁場方向のスピン成分を定量評価することができなかった。本年度はこの問題を解決し、電子スピンの完全なコヒーレンス測定を可能とした。

### (2) 電子スピンの位相緩和に関する知見の取得

量子ビットのメモリー時間は位相緩和時間で決まるが、この位相緩和には様々な物理機構が関与する。従来は電子スピンの位相を直接測定する手法がなかったため、位相緩和機構について部分的な情報しか得られなかった。本課題初年度は、TKR測定を利用し位相緩和に関する新たな知見を得た。特に、電子スピンの初期状態に依存した位相緩和を調べた結果、全方位で全く等価な位相緩和を観測した。従来測定不可能であった磁場方向の緩和も、予想した縦緩和ではなく横緩和に支配されることが判明し、スピンドYNAMIKSの機構解明に向け、重要な知見を得た。

### (3) 量子ドットにおける磁気光学カー回転測定に向けた顕微磁気光学測定系の構築

量子ドットにおける電子スピン状態のトモグラフィ測定と任意光制御を行うため、顕微磁気光学測定系の構築を行った。本顕微鏡を用いることにより、局所的なスピン状態の

観測を行うことができ、スピンの量子性を利用することができる。

本課題2年目以降の研究では、初年度に行った量子井戸におけるトモグラフィックカー回転 (TKR) 測定を発展させ、量子ドットにおける TKR 測定を行う実験系を構築した。この際、軽い正孔を仲介とするV型遷移の利用が鍵となる。量子ドットの電子状態は十分離散化しており、パウリ排他律によってシングレット (一重項状態) のみが許容されるため、量子井戸の場合より厳密なトモグラフィ測定が可能である。

量子ドットの実験には Q 値が200程度の共振器中に埋め込まれた GaAs/AlGaAs 単一量子ドットを用いた。この単一量子ドットの光励起発光スペクトルの磁場依存性を詳細に調べた結果、通常の中性励起子だけでなく、電子一つを過剰に持つ負の荷電励起子 (トリオン) の存在を確認した。これに磁場を印加すると、発光スペクトルは4本に分裂し、電子と正孔のゼーマン分裂幅の違いを反映した不均等なスペクトル分裂を観測した。この分裂から電子と正孔の g 因子を同定し、これらが大きく異なることを示した。これにより、本研究の目的となる電子スピン状態の光書き込み、光制御、光トモグラフィ測定に不可欠なV型三準位構造が実現できることを明らかにした。量子井戸の場合に軽い正孔励起子が重要であったのと同様に、量子ドットの場合においても軽い正孔成分の混成がこのV型三準位構造を可能としている。

最終年度にはこの単一量子ドットを用いた電子スピン状態の光書き込み、光制御、光トモグラフィ測定の実験を試みたが、単一電子スピンのTKR信号を読み出すのに十分な測定感度を得ることができなかった。そこで、量子ドットのスピン制御に関する世界的第一人者であるスタンフォード大学の山本喜久教授の研究室に学生を3ヶ月派遣し、研究代表者自らも1週間滞在して本研究課題に直接関連する実験に立ち会った。滞在期間中に単一電子スピンの光制御とこれを用いた電子スピントモグラフィ測定の実験を行った。本実験で利用したスピン制御は一軸性のものであるが、スピン歳差運動を組み合わせることにより、擬似的に任意軸のスピン制御が可能となる。このスピン制御と発光によるやはり一軸性のスピン射影の組み合わせにより、電子スピントモグラフィ測定を可能としたものである。本研究課題で当初目標としたカー回転による電子スピントモグラフィとは手法的に異なるが、スピンの量子性をトモグラフィ的に観測する上では同等の効

果を得ることができる。さらに滞在期間中には、電子スピンではなく正孔スピンを用いた同様の実験にも立会い、電子スピンだけではなく、正孔スピンにも同様の手法が適用できることを確認した。

さらに、量子井戸を用いた実験については、従来のスピン状態のトモグラフィ測定をさらに進化させた転写プロセスのトモグラフィ測定の実験に成功した。これにより、電子スピン自体の量子性のみならず、光から電子スピンへの転写の過程自体が量子的であることを明らかにした。光書き込みおよび光読み出しの両過程を合わせたプロセス全体の忠実度は約80%となり、古典限界である2/3を超えた量子的なものであることを示すことに成功した。これに加え、電子スピントモグラフィ測定についても、光感受率の虚部を利用した従来のトモグラフィックカー回転 (TKR) のみならず、光感受率の実部を利用したトモグラフィックカー楕円率 (TKE) と呼ぶ手法でもスピンコヒーレンスの3次元的な測定が可能であることを示し、コヒーレントなカー効果を用いたスピンコヒーレンス評価の一般的概念を構築することに成功した。

#### 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4件)

1. H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Ono, Y. Rikitake, N. Yokoshi, H. Imamura, "Coherent spin preparation, manipulation and read-out with light and microwaves in a quantum well and dot", *J. Phys.* **245**, 012001 (2010). 査読有 DOI:10.1088/1742-6596/245/1/012001
2. Takahiro Inagaki, Hideo Kosaka, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori, and Keiichi Edamatsu, "Measurement of Electron Spin States in a Semiconductor Quantum Well Using Tomographic Kerr Rotation", *Jap. J. Appl. Phys.*, **49**, 04DJ09 (2010). 査読有 DOI:10.1143/JJAP.49.04DJ09
3. H. Kosaka, "Photon-to-Electron Quantum Information Transfer", *J. Appl. Phys.* 014193JAP (2010). 査読有 DOI:10.1117/12.872710
4. Makoto Kuwahara, Takeshi Kutsuwa, Keiji Ono and Hideo Kosaka, "Single charge detection of an electron created by a photon in a g-factor engineered quantum dot", *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 163107 (2010). 査読有 DOI:10.1063/1.3407513

[学会発表] (計 34 件)

1. 三森康義, 朝倉健太, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅、「III-V 族自己形成型半導体量子ドットにおけるスペクトル分解フォトンエコー」、25pHB-10 2615、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
2. 朝倉健太, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅、「III-V 族自己形成型半導体量子ドットの励起子ラビ振動における局所電場効果 II」、25pPSA-54 2100、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
3. 水落憲和, 加藤宙光, 山崎聡, F. Jelezko, J. Wrachtrup, 力武克彰, 小坂英男、「ダイヤモンド中の単一 NV 中心による室温でのベル測定の実験研究」、25pRB-11、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
4. 力武克彰, 水落憲和, 小坂英男、「ダイヤモンド中の単一 NV 中心への光量子状態転写の理論」、25pRB-12、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
5. 稲垣卓弘, 小坂英男, 三森康義, 枝松圭一, 力武克彰、「半導体中の電子スピンへの光量子状態転写のプロセスとモググラフィ測定実験」、25pRB-13、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
6. 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 金大貴, 中山正昭, 大畠悟郎, 岡寿樹, 安食博志, 石原一、「CuCl 微小共振器中における励起子分子-光子結合状態」26aHA-10、日本物理学会 2011 年春季大会 (第 66 回年次大会)、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日。
7. H. Kosaka, "Quantum interface between photons and electron spins in a semiconductor", Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication (a part of SPIE-OPTO)" (Invited talk), San Francisco, USA, Jan 27, 2011. PAPER NUMBER: 7948-44,
8. Fumihiko Kaneda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, "Generation and Characterization of Bound Entanglement in Optical Qubits"(oral), The 2nd International Conference on Quantum Information and Technology (ICQIT 2010), Oct. 21 (2010)
9. H. Kosaka, "QUANTUM MEDIA CONVERSION BETWEEN PHOTONS AND ELECTRONS IN SOLIDS FOR QUANTUM REPEATERS" (Invited talk), Updating Quantum Cryptography and Communications (UQCC), Tokyo, Japan, October 18-20, 2010.
10. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, N. Ohtani, "Excitonic Rabi oscillations in self-assembled semiconductor quantum dots" (poster), The 3rd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems (SOIM 2010), Sendai, Japan, Oct. 19 (2010).
11. Fumihiko Kaneda, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, "Experimental demonstration of bound entanglement in optical qubits", The 3rd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems (SOIM 2010), Sendai, Japan, Oct. 19 (2010).
12. Matsuura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Miyazaki, D. Kim, M. Nakayama, G. Ohata, H. Oka, H. Ajiki, H. Ishihara, "Biexcitonic Effect in semiconductor Microcavities", The 3rd Student Organizing International Mini-Conference on Information Electronics Systems (SOIM 2010), Sendai, Japan, Oct. 19 (2010).
13. Takahiro Inagaki, Hideo Kosaka, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori, and Keiichi Edamatsu, "Optical Spin State Tomography of Electrons in Full Bloch Bases for Quantum Storage" (poster), The 3rd International Conference on Updating Quantum Cryptography and Communications (UQCC 2010), NII, Tokyo, Japan, Oct. 19 (2010).
14. Ruiho Jin, Jun Zhang, Ryosuke Shimizu, Nobuyuki Matsuda, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka and Keiichi Edamatsu, "Efficient generation of heralded pure single photons and their nonclassical interference"(poster), The 3rd International Conference on Updating Quantum Cryptography and Communications (UQCC 2010), NII, Tokyo, Japan, Oct. 19 (2010).

15. Masahiro Yabuno, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, Keiichi Edamatsu, "DIRECT GENERATION OF FREQUENCY-UNCORRELATED PHOTONS FOR MULTI-PHOTON INTERFERENCE" (poster), The 3rd International Conference on Updating Quantum Cryptography and Communications (UQCC2010), NII, Tokyo, Japan, Oct. 19 (2010).
16. 余越伸彦, 今村裕志, 小坂英男, 「共振器中量子ドット間への量子もつれ配信手法の提案」、23pPSB-63、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 23-26 日。
17. 朝倉健太, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 佐々木雅英, 大谷直毅, 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットの励起子ラビ振動における局所電場効果」、23pRE-8、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 23-26 日。
18. 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 大畠悟郎, 金大貴, 中山正昭, 岡寿樹, 安食博志, 石原一, 「四光波混合法による CuCl 微小共振器中の励起子分子の観測」、25pPSB-17、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 23-26 日。
19. 藪野正裕, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「群速度整合 PPKTP を用いた多光子生成 II」、25pRF-7、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 23-26 日。
20. 金田文寛, 清水亮介, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 「偏光 qubit における Smolin 状態の生成」、25pRF-9、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 23-26 日。
21. H. Kosaka H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Ono, Y. Rikitake, N. Yokoshi, H. Imamura, "Quantum media conversion from a photon to an electron spin" (Invited talk), International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 22-24, 2010.
22. T. Inagaki, H. Kosaka, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori and K. Edamatsu, "Full-dimensional analysis of coherent spin dynamics in a semiconductor" (Poster), International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 22-24, 2010.
23. H. Kosaka, "Photon to electron quantum information transfer" (Invited talk), The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS30), Seoul, Korea, July 25-30, 2010.
24. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, N. Ohtani, "Excitonic Rabi oscillations in semiconductor quantum dots observed by photon echo spectroscopy" (poster), The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS30), Seoul, Korea, July 25-30, 2010.
25. H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Ono, Y. Rikitake, N. Yokoshi, H. Imamura, "Spin coherent read, write, manipulation of electrons with light in solids" (Poster), The 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC2010), University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, July 19 - 23 (2010).
26. Ruibo Jin, Jun Zhang, Ryosuke Shimizu, Nobuyuki Matsuda, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka and Keiichi Edamatsu, "Nonclassical interference between a heralded pure single photon state and a weak coherent state" (poster), The 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2010), University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, July 19 - 23 (2010).
27. Fumihiko Kaneda, Hirofumi Suzuki, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, and Keiichi Edamatsu, "Frequency entanglement of photons generated by two-period quasi-phase matched parametric down-conversion" (poster), The 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2010), University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, July 19 - 23 (2010).
28. Masahiro Yabuno, Ryosuke Shimizu, Yasuyoshi Mitsumori, Hideo Kosaka, Keiichi Edamatsu, "High-flux photon pair

- source for multi-photon interference”, The 10th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC 2010), University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, July 19 - 23 (2010).
29. K. Edamatsu, W. Ueno, R.-B. Jin, F. Kaneda, M. Yabuno, T. Kato, N. Matsuda, S.-Y. Baek, Y. Mitsumori, H. Kosaka, R. Shimizu “Advanced entangled photon sources”, The 4th International Symposium on Information Electronics Systems, Sendai, Japan, July. 8 (2010).
  30. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, N. Ohtani, “Excitonic Rabi oscillations in semiconductor quantum dots observed by photon echo” (poster), The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXICON 2010), University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, July 11-16 (2010).
  31. H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, Y. Rikitake, H. Imamura, “Quantum Information Exchange between Photons and Electrons in Solids” (Invited talk), International conference on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials, Osaka university convention center, Japan, May 30-Jun.4, 2010.
  32. H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, K. Ono, Y. Rikitake, N. Yokoshi, H. Imamura, “Coherent spin preparation, manipulation and read-out with light and microwaves in a quantum well and dot”(Oral), Quantum Dot (QD 2010), East Midlands Conference Centre, Nottingham, UK, April 26-30 (2010)
  33. H. Kosaka, H. Shigyou, T. Inagaki, Y. Rikitake, Y. Mitsumori, K. Edamatsu, T. Kutsuwa, M. Kuwahara, Keiji Ono, N. Yokoshi, H. Imamura, “Quantum information exchange between photons and electrons in solids” (Invited talk), International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT), Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, Apr. 6-9, 2010.
  34. Takahiro Inagaki, Hideo Kosaka, Yoshiaki Rikitake, Hiroshi Imamura, Yasuyoshi Mitsumori, and Keiichi Edamatsu (Poster), “Spin state tomography of electrons in full Bloch bases”, International Symposium on Physics of Quantum Technology (ISPQT),

Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, Apr. 6-9, 2010.

〔図書〕 (計 3 件)

1. 小坂英男、「電子情報通信学会ハンドブック知識ベース」、オーム社出版、2011年3月発刊、S 2群「ナノ・量子・バイオ」5編「量子通信と量子計算」2章「量子ネットワーク」1節「量子中継」執筆 2-7 ページ
2. 小坂英男、「量子ドットエレクトロニクスの最前線」、NTS 出版、荒川安彦 監修、2011年3月15日発刊、第2編 第3章 第3節「光子および電子スピンを利用した量子情報・通信デバイスの開発」執筆 353-365 ページ
3. 小坂英男、「フォトニックナノ構造の最近の進展」、CMC 出版、野田進 監修、2011年3月31日発刊、総ページ数13頁、第3編「量子情報、量子通信」、第8章「光子と電子の量子メディア変換」執筆 154-165 ページ

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.quantum.riec.tohoku.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小坂 英男 (KOSAKA HIDEO)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：20361199