

令和元年6月14日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03821

研究課題名(和文) 固体ナノ構造における波長マネジメントを用いたオンデマンドもつれ光子源の研究

研究課題名(英文) Creation of on-demand entangled photon sources in solid state nanostructures

研究代表者

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・主席研究員

研究者番号：10393795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：もつれ光子発生のため、2種類の固体ナノ構造を研究対象とし、(1)量子ドットから発生するもつれ光子対の発生、(2)酸化エルビウム(ErO)結晶を用いたもつれ光子対の発生、(3)高制御性ナノワイヤ量子ドット形成の3つの研究項目に取り組んだ。(1)では、半導体ナノ構造でのスピン物性の解明に取り組み、スピン運動に関する成果を得て、ハイインパクトジャーナルで発表した。(2)では、酸化エルビウムの量子性や光学特性、試料の作製法に関して成果を得て、複数の論文発表を行った。(3)では、複数のナノワイヤ構造の作製を行い、これまで困難であった通信波長帯でのレーザー発振を実現させ、論文と報道発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の要素研究は、固体ナノ構造における光物性に関する新知見を与える共に、もつれ光子の新しい発生法や光非線形効果に関する成果ももたらすものである。また、比較的新しい材料である、酸化エルビウムや半導体ナノワイヤの材料創成の進展にもつながる。これらの成果は、学術的に高い価値を持つとともに、ナノ構造物性、光通信、量子情報などの広範囲の応用分野の成果につながる公共性の高いものとして位置付けられる。また、研究成果を発展させれば、ICTの効率向上や高速化をもたらす新たな研究分野の開拓につながる。これは、現代の社会的要請に応えるものであり、社会的インパクトは非常に強いと言える。

研究成果の概要(英文)：We have used two solid-state nanostructures to create entangled photons. We have studied three research topics: (1) Creation of entangled photon pairs from quantum dots (2) Entangled photons in ErO crystals. (3) Fabrication of quantum dots in well-controlled nanowire structures. For topic (1), we clarified spin physics in semiconductor nanostructures. We obtained important results on drifting spins and presented in a high-impact journal. For topic (2), we have shown the outputs on quantum natures, optical properties and crystal growth techniques in ErO-based materials. For topic (3), we have achieved laser emission in hetero-nanowires whose laser wavelength covers all telecom-bands. This results are published in Science Advances and presented in a press-release.

研究分野：量子光物性

キーワード：もつれ光子 酸化エルビウム 半導体ナノワイヤ 量子ドット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の ICT (Information and Communication Technology) の進展に伴い、情報処理能力の向上と、同時に、安全性の確保が求められている。それに応える技術として量子情報処理が注目されている。これは、量子力学を利用して究極的安全性や超高速演算を実現させるもので、量子通信、量子計算など活発に研究されている。実験では、様々な媒質が用いられるが、応用には量子ドットなどの固体系が有利であると考えられる。

量子通信は、100km 程度の近距離では、東京 QKD に代表されるように実用レベルに近づいている [http://www.nict.go.jp/press/2010/10/14-1.html]。しかし、今後の応用では、長距離通信や多数でのネットワーク構築が欠かせないため、量子中継技術が必要である。量子中継は、短距離で量子もつれを形成し、それを拡張して長距離通信を行う。これには、多数のもつれ光子対が必要となる。光子対の発生方法は、多くの提案があるが、複数の単一光子を用いる手法が有望である。単一光子の発生には、光非線形効果の利用と、固体ナノ構造の利用が知られている。光非線形効果では、2つの単一光子による、もつれ光子が実現されている [Opt. Exp. 18, 8182(2010)]。しかし、光は確率的に発生するため、全体の発生確率は、光数のべき乗に比例して低下するため、多数の同時動作は現実的でない。一方、量子ドットの様な固体ナノ構造では、構造中の電子は必ず発光するため、オンデマンド (任意タイミング) での単一光子発生が可能である。しかし、光子の波長が不均一なため、複数のもつれ形成は未達成である。従って、大規模量子中継に必要なオンデマンドなもつれ光子源は実現されてないと言える。

現在、もつれ光子発生で一般的に用いられる光非線形結晶は、LiNbO₃(LN)などが知られており、periodic-polling 技術、導波路作製技術を用いて、非常に高い光波長の変換効率を実現されている。また、通信システムに導入され、信頼性も高い。この技術は、主に強いポンプ光とともに用いられるが、技術の高度化により、単一光子の様な弱い光でも高効率変換が期待できる。従って、量子ドットからの単一光子の波長変換も可能である。

単一光子発生に用いられる量子ドットは、半導体ナノ構造であり、多くの量子的性質が実現されている。この構造は、従来は、その形状や、発光波長がランダムで制御が困難であったが、ナノワイヤ作製技術によって、その制御性が向上している。また、酸化エルビウム (ErO) のように、発光波長が均一である新しいナノ材料も研究されている。

以上から、現在の高度な光非線形技術、研究が進展している固体ナノ構造作製技術とを組み合わせ、2つの相乗効果を利用すれば、オンデマンドなもつれ光子源を実現させ、量子情報研究の飛躍的発展と、フロンティア研究の開拓、およびイノベーション技術実現が可能であると考えられる。

2. 研究の目的

固体ナノ構造における発光過程を制御し、光非線形結晶による波長マネジメント技術と組み合わせ、通信波長帯でオンデマンドにもつれ光子を発生する光源を実現する。固体ナノ構造としては、まず、オンデマンド単一光子源として実績のある単一量子ドットを用いる。量子ドットの発光波長はドットごとに異なるが、光非線形過程を用いて波長を変換し、同一スペクトルの単一光子を得る。この方法で、2個の単一光子を Hong-Ou-Mandel 干渉させて、もつれ光子対を生成する [Hong, Ou and Mandel, Phys. Rev. Lett., 59, 2044(1987)]。

固体ナノ構造として、酸化エルビウム (ErO) も用いる。この構造の発光波長は、Er の電子状態で決まり、異なる試料でも通信波長帯の同一波長で発光する。この ErO とフォトニック結晶とを組み合わせ、真空ラビ振動を実現させ、単一光子、もつれ光子を発生させる。また、目的達成のため、半導体ナノ構造や ErO 構造作製および光学評価技術の発展を通して学術貢献も行い、光デバイス、量子デバイスの性能向上も目指す。

3. 研究の方法

もつれ光子発生のため、2種類の固体ナノ構造を研究対象とし、(1)量子ドットから発生する単一光子を用いたもつれ光子対の発生、(2)酸化エルビウム (ErO) 結晶を用いたもつれ光子対の発生、(3)高制御性ナノワイヤ量子ドット形成の3つの研究項目に取り組み、目的達成のための要素技術を確立させる。計画前半では、通信波長帯での単一光子発生の検証を可能にする。並行して、固体ナノ構造特性の作製技術向上も進める。

計画後半には、2種類のナノ構造で、Hong-Ou-Mandel 干渉を用いて、もつれ光子を発生させる。発光効率の向上の検討を進めて装置化を行い、量子情報関連の複数の研究進展に貢献する。

4. 研究成果

もつれ光子発生のため、3つの研究項目に取り組んだ。それぞれの項目について代表的な成果を紹介する。

(1) 半導体ヘテロ構造におけるドリフトスピン制御の研究

半導体中のスピンは、従来の半導体デバイスで用いられてこなかった物理量であり、これを利用することで、新しいデバイス機能実現が期待されている。また、スピンは量子的性質を持つため、量子情報研究の発展にも貢献する可能性がある。従来、スピンは外部磁場によって制御可能であることが知られていたが、大型の装置が必要で、デバイス応用には不向きであった。

我々は、スピンの化合物半導体中で移動することにより、スピン軌道相互作用に伴って実効的な磁場（有効磁場）が発生し、その磁場によってスピンの制御が可能であることに注目している。この磁場を制御する方法として、半導体にゲート電界（縦電界）を印加することを提案し、スピンの保持される時間が拡大されることを示してきた。本成果では、スピンを移動させるための電界（横電界）によっても、スピんに働く有効磁場を制御可能で、スピンの運動が変化することが分かった。従来は、スピンの運動は横電界には依存しないことが知られていたが、運動を詳細に解析すると、スピンの実効的な温度が変化し、それに伴い有効磁場も変化することが分かった。有効磁場が変化すると、図1のように、スピンの歳差運動周期（図での振動周期）が変化する。本成果は、スピンの運動を精密に制御することが必要な新しいデバイスの設計指針となる。[論文]

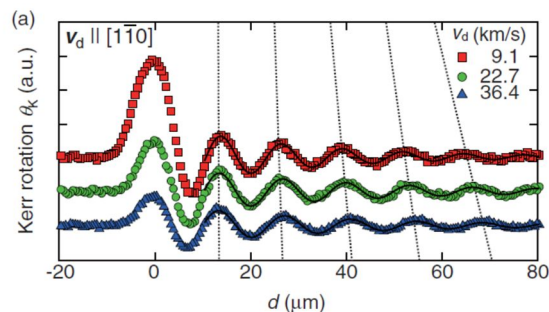


図1：移動スピンの横電界（ vd ）依存性

(2) 同位体分離によるエルビウムのコヒーレンス性の増大

エルビウムは、通信波長帯である、 $1.5\ \mu\text{m}$ 付近の光と強く相互作用することが知られており、光増幅器に应用され、実際の光通信デバイスで広く使われている。一方、エルビウムを適切な結晶中に配置すると、量子性の強い光の保持を行うことが期待され、量子情報処理で重要な量子メモリとしての応用が期待されている。この量子性は、エルビウムの同位体によって異なり、 ^{167}Er で最も強いことが予測されるが、この同位体は自然界では、23%を占めるに過ぎない。他の同位体が混在すると、エルビウム中の電子と、多種多様な相互作用が発生し、量子性が低下してしまう。本研究では、同位体分離を行い、 ^{167}Er のみを含む結晶を作製して、ホールバーニング法を用いて、量子性（コヒーレンス時間）を測定した。同位体分離を行った試料と、行わない試料の電子数緩和時間を比較すると、ほとんど差がないことが分かった。しかし、コヒーレンス時間は、同位体分離を行うと、4倍程度長くなった。図2はその結果であり、同位体分離したErのスペクトル(a)の線幅は、分離していないもの(b)に比べて、 $1/4$ 程度である。これは、エルビウムを同位体分離することで、電子のスピンとエルビウム原子の核スピン間の相互作用が減少し、量子性が長時間保持されるようになったためと解釈できる。本結果から、エルビウムを量子情報デバイスに应用する際には、同位体分離が不可欠であることが分かった。今後の、量子メモリ動作実現に向けても重要なステップとなる。[論文]

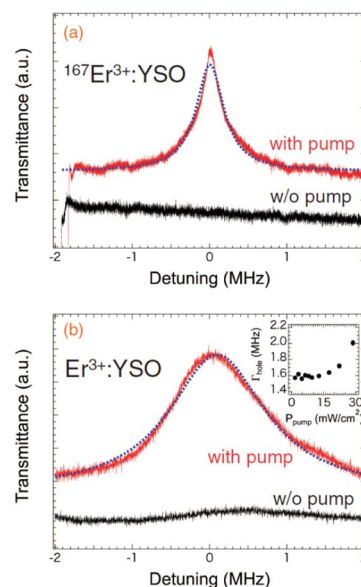


図2：ホールバーニングスペクトル

(3) 半導体ナノワイヤの通信波長帯レーザ発振の実現

現在、情報通信分野を始めとして、色々な分野で半導体レーザが使われている。このデバイスでは、その基本構造として、ヘテロ構造と呼ばれる構造を持つ。ヘテロ構造は異なる種類の半導体を接合したもので、その組合せは半導体固有の格子定数と呼ばれる量が近い半導体に限られていた。近年、半導体ナノワイヤ構造が注目され研究されているが、その理由の一つとして、格子定数が大きく異なる半導体でのヘテロ構造の形成が可能であることである。従来にないヘテロ構造が形成されることで、未知の物性の発現や、新しい機能を持ったデバイス実現が期待されている。すでに種々の種類のナノワイヤを用いた電子・光デバイス機能が報告されている。レーザ発振も得られているが、材料作製の困難さが理由で、その発振波長は、紫外域から近赤外領域に限られており、赤外領域である通信波長帯では実現されていなかった。我々は、他のグループとは異なる、自己触媒法と呼ばれる方法でナノワイヤを作製することに成功し、ヘテロ構造の形成も実現させた。また、半導体材料とその構造を精密に制御することによって、発振波長の制御を実現させ、通信波長帯全てをカバーするレーザ発振を得た。これは、高度な結晶成長技術によ

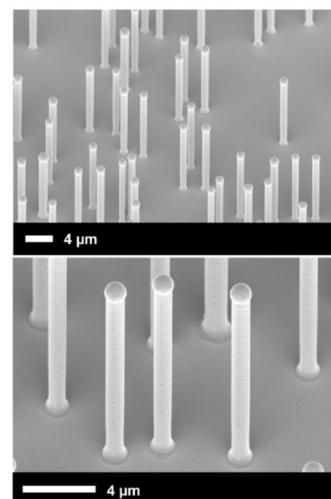


図3：ヘテロナノワイヤの顕微鏡写真

って、ヘテロナノワイヤの高純度化と高品質化が得られたためである。本成果は、ナノワイヤの応用範囲を広げるものであり、通常の通信用途に加え、最近注目を集めているシリコンナノフォトニクス分野の発展にも貢献することが期待できる。この成果に関しては、Science Advance 誌での発表と報道発表を実現させ、注目を集めた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

Takehiko Tawara, Giacomo Mariani, Kaoru Shimizu, Hiroo Omi, Satoru Adachi and Hideki Gotoh, "Effect of isotopic purification on spectral-hole narrowing in $^{167}\text{Er}^{3+}$ hyperfine transitions" Appl. Phys. Express, Vol. 10, pp.042801-1-4 (2017)(doi: 10.7567/APEX.10.042801).

Takehiko Tawara, Yoshihiro Kawakami, Hiroo Omi, Reina Kaji, Satoru Adachi, and Hideki Gotoh, "Mechanism of concentration quenching in epitaxial $(\text{Er}_x\text{Sc}_{1-x})_2\text{O}_3$ thin layers", Optical Materials Express Vol. 7, Issue 3, pp. 1097-1104 (2017)(doi: 10.1364/OME.7.001097).

G. Zhang, K. Tateno, T. Sogawa and H. Gotoh, "Diameter-tailored telecom-band luminescence in InP/InAs heterostructure nanowires grown on InP (111)B substrate with continuously-modulated diameter from microscale to nanoscale", Nanotechnology, Vol.29, pp.152202-1-12(2018)(doi: 10.1088/1361-6528/aaab17).

Y. Kunihashi, H. Sanada, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, K. Nakagawara, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, "Drift-induced enhancement of cubic Dresselhaus spin-orbit interaction in two-dimensional electron gas", Phys. Rev. Lett. Vol. 119, pp.187703-1-5 (2017)(doi:10.1103/PhysRevLett.119.187703).

G. Zhang, M. Takiguchi, K. Tateno, T. Tawara, M. Notomi, and H. Gotoh, "Telecom-band lasing in single InP/InAs heterostructure nanowires at room temperature", Science Adv., Vol. 5, pp.eaat8896-1-9 (2019) (doi: 10.1126/sciadv.aat8896).

Y. Tanaka, Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta and T. Sogawa, "Phase velocity of drifting spin wave packets in semiconductor two-dimensional electron gas", Applied Physics Express, Vol. 12, pp.013001-1-5(2019) (doi: 10.7567/1882-0786/aaf170).

T. Inaba, T. Tawara, H. Omi, H. Yamamoto, and H. Gotoh, "Epitaxial growth and optical properties of Er-doped CeO₂ on Si(111)", Opt. Mat. Express, Vol.8, No.9, pp.2843-2849 (2018) (doi: 10.1364/OME.8.002843).

他 1 件

[学会発表] (計 43 件)

Guoqiang Zhang, and Hideki Gotoh, "InP/InAs heterostructure nanowires grown by indium-particle-assisted vapor-liquid-solid mode" 31st DGKK Workshop: Epitaxy of III/V Semiconductor, Duisburg. Germany, December (2016).

Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, "Spin manipulation of drifting electrons by electrically-controlled spin-orbit interaction in GaAs quantum well" International Conference on the Physics of Semiconductors 2016 (ICPS2016), Tu-B1.5, Beijing, China, August (2016).

H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, P.V. Santos and T. Sogawa, "Acoustic transport and manipulation of electron spins in semiconductors" SPICE Workshop, "Quantum Acoustics - Surface Acoustic Waves meets Solid State Qubits", Mainz, Germany, May (2016).

G. Zhang, K. Tateno, T. Sogawa, and H. Gotoh, "Site-defined InP/InAs heterostructure nanowires with tunable diameter by in-situ diameter-tuning technique" The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016), MoD3-3, Toyama, Japan, June (2016).

章 国強、滝口 雅人、館野 功太、後藤 秀樹「通信波長帯ナノワイヤレーザの波長制御」第 64 回応物関係連合講演会、15p-421-9、2017 年 3 月

M. I. Jspeert, M. Hiraishi, T. Tawara, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, and H. Gotoh "State Preparation and Lifetime Measurements through Spectral Hole Burning in $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ ", International School and Symposium on Nanoscale Transport and Photonics (ISNTT2017), PTu18, November, Atsugi, Japan (2017).

M. IJspeert, G. Mariani, T. Tawara, K. Shimizu, H. Omi, S. Adachi, H. Gotoh,

"Population trapping through spectral hole burning in 167Er³⁺:Y₂SiO₅" 2017 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2017), G-3-06, 19-22 September, Sendai, Japan (2017).

Guoqiang Zhang and Hideki Gotoh, "InP/InAs heterostructure nanowires by self-catalyzed VLS mode" The 15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto, Japan, August (2017).

H. Sanada, Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, "Diffusion Dynamics of Long-lived Electron Spins in Undoped GaAs Quantum Wells" 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems/18th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (EP2DS-22/MSS-18), ST-10, Pen State, USA, August (2017).

Guoqiang Zhang and Hideki Gotoh, "Au-free InP/InAs heterostructure nanowires", Compound Semiconductor Week 2017 (CSW2017), B1.7, Berlin, Germany, May (2017).

平石 真也、IJSpeert Mark、俵 毅彦、尾身 博雄、後藤 秀樹「167Er³⁺:Y₂SiO₅における超微細構造準位間でのラビ振動の測定」第65回応用物理学学会春季学術講演会、18p-C301-10、2018年3月

G.Zhang, D.Gnatek, M.Takiguchi, K.Tateno, S.Sasaki, X.Xu, T.Tawara, and H. Gotoh, "Nanowire-based telecom-band light emitting diodes", 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), M-6-03, September, Tokyo (2018).

H. Sanada, A. Stramma, Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, "Transient spectroscopy of long-lived dark spins in GaAs quantum wells", 10th International School and Conference on Physics and Applications of Spin Phenomena in Solids (PASPS10), TuP72, August, Linz, Austria (2018).

Y. Kunihashi, H. Sanada, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa, "Current-controlled Dresselhaus spin-orbit interaction" 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018), Spintronics and spin phenomena 7-5, August, Montpellier, France (2018).

G. Zhang and H.Gotoh, "InP/InAs heterostructure nanowires grown by self-catalyzed VLS mode", Nanowire Week 2018, I-2, June, Hamilton, Canada (2018).

Yusuke Tanaka, Yoji Kunihashi, Haruki Sanada, Hideki Gotoh, Koji Onomitsu, Makoto Kohda, Junsaku Nitta, and Tetsuomi Sogawa, "Phase velocity of drifting spin wave packets in GaAs quantum well", 第65回応用物理学学会春季学術講演会、12a-M101-11、2019年3月。

他 27 件

〔産業財産権〕

出願状況（計 3 件）

名称：スピンの軌道相互作用の制御方法

発明者：国橋要司、眞田治樹、後藤 秀樹、寒川哲臣、好田 誠、新田淳作

権利者：日本電信電話株式会社

種類：特許

番号：特願 2016-087730

出願年：2016 年

国内外の別： 国内

名称：スピンの軌道相互作用の増大方法およびスピンのデバイス法

発明者：国橋要司、眞田治樹、後藤 秀樹、寒川哲臣、好田 誠、新田淳作、蒲生寛武、榎涼斗

権利者：日本電信電話株式会社

種類：特許

番号：特願 2017-076621

出願年：2017 年

国内外の別： 国内

名称：スピンの流制御装置

発明者：国橋要司、後藤 秀樹、眞田治樹、田中祐輔、寒川哲臣、好田 誠、飯笹大介、新田淳作

権利者：日本電信電話株式会社

種類：特許

番号：特願 2018-169479

出願年：2018 年
国内外の別： 国内

〔その他〕

報道発表

光通信波長帯ナノワイヤレーザの室温動作に成功 ~ 通信用微小レーザ光源の光回路集積に道
~ http://www.brl.ntt.co.jp/J/2019/02/latest_topics_201902241045.html

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：俵 毅彦

ローマ字氏名：Tawara, Takehiko

所属研究機関名：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：主幹研究員

研究者番号 (8 桁): 40393798

研究分担者氏名：国橋 要司

ローマ字氏名：Kunihashi, Yoji

所属研究機関名：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：研究主任

研究者番号 (8 桁): 40728193

研究分担者氏名：眞田 治樹

ローマ字氏名：Sanada, Haruki

所属研究機関名：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁): 50417094

研究分担者氏名：章 国強

ローマ字氏名：Zhang, Guoqiang

所属研究機関名：日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所

部局名：量子光物性研究部

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁): 90402247

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。