

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310097

研究課題名(和文)半導体マクロアトムにおける弾性フォノン波を用いた量子相関フォトニクス

研究課題名(英文)Quantum Correlation Photonics in Semiconductor Macroatoms with Ballistic Phonon Waves

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・主幹研究員

研究者番号：10393795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円、(間接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、半導体マクロアトムの配列を作製し、識別可能な多数の電子スピン量子ビットを生成することである。この目的達成のため、(1)スピン初期化および回転・検出(2)弾性フォノン波を用いた励起子輸送(3)高制御性マクロアトム形成の3つの研究項目に取り組んだ。まず、偏光ポンピング法と荷電励起子の偏光特性とを用いてスピンの初期化を達成させた。スピン回転は、弾性フォノン波によるスピン輸送技術と組み合わせ、外部磁場なしでスピンの任意方向の回転制御に成功した。マクロアトム形成に関しては、急峻なヘテロ界面を持つInP/InAs ナノワイヤと、自己触媒法を用いた高純度のナノワイヤを実現した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research project is to demonstrate spatially-distinguishable spin qubits in ordered semiconductor macro-atoms. The specific research subjects as follows: (1) Initialization, rotation and observation for spins (2) Transport of excitons with ballistic phonon waves (3) Fabricate highly-tailorable macro-atoms. First, we have achieved spin initialization using the polarization pumping method and polarization anisotropy in charged excitons in single macroatoms. Next, we have accomplished the spin rotation of arbitral direction utilizing an electron spin transport technique by ballistic phonon waves. No external magnetic fields were employed, which are completely different from previous conventional methods. We have also fabricated InP/InAs hetero-nanowires having very sharp heterointerfaces. Moreover, we have developed a technique to create high-purity nanowires with an original self-catalyst method.

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

キーワード：量子ドット 量子コンピュータ 弾性フォノン 量子相関 スピン光学

1. 研究開始当初の背景

近年の ICT(Information and Communication Technology) の進展に伴い、これまで以上の情報処理能力の向上と、同時に、環境への配慮が求められている。その要求に応える有力な手段として量子情報処理、特に量子計算(コンピューティング)が注目されている。この技術は、量子力学を積極的に利用し、超高速演算と超低消費電力を同時に実現させることを可能とする。量子計算機は様々な媒質で研究されているが、幅広い応用には半導体量子ドットなどの固体系が有利である。量子ドットは半導体ナノ構造の一種であり、構造中に電子、および励起子(電子と正孔の結合体)を生成すると、ドット内に閉じ込めるという特徴を持つ。この電子、励起子を量子ビットとして利用すれば、量子計算機実現の可能性がある。今までに、本研究の提案者と他グループにより量子ドット中の励起子を用いた1および2ビットの量子ゲートが実現されたが、量子計算は未だに実施されていない。量子計算には、識別可能な多数ビットの構成法と量子ビット間(隣接と遠隔)の量子相関形成法とが必要であるが、これらはトレードオフの関係にあると言われ、その手法は確立されていない。従って、計算実行には、この多ビット化と相関形成、および量子ドット作製技術のブレークスルーが必要であると分析される。

2. 研究の目的

ナノワイヤ・量子ドット技術を半導体マクロアトム技術に発展させたものをベースとする。

この技術を用いて、それぞれを1 $\mu$ m以上離してマクロアトム配列を作製し、空間的に識別可能な多数の電子スピン量子ビットを生成する。このマクロアトムにおいてフォノン波を用いて励起子を輸送して量子ビット間の相関を実現させ、識別可能な多数ビットを持つ量子計算機を構成する。また、マクロアトムを用いた人工分子・物質実現に発展させ、マクロアトムフォトンクスという新規研究分野の開拓を目指す。

3. 研究の方法

(1)スピン初期化および回転・検出(2)弾性フォノン波を用いた励起子輸送(3)高制御性マクロアトム形成の3つの研究項目に取り組み、目標達成のための要素技術を確立させる。(1)では、単一のスピン量子ビット実現のために必要な、光学的手法によるスピン初期化、および、回転技術を確立させる。(2)では、スピン相関実現のため、弾性フォノン波を用いて1 $\mu$ m程度離れた2個のマクロアトム間での励起子輸送を実現させる。(3)では、ナノワイヤ技術を高度化させて高制御性の1個および2個のマクロアトムの作製を可能にする。研究期間終了までに3つの技術を融合させて目的を達成させると共に、長期的目標で

ある、多数の量子相関形成、およびマクロアトム結合体実現に向けて発展させる。

4. 研究成果

(1)スピン初期化および回転・検出

単一マクロアトムにおけるスピン量子ビット実現に向け、静磁場を用いない単一スピン初期化法を確立させる。スピン量子ビットには、スピンの向きを偏極化(初期化)、その偏極の操作(回転)および偏極の検出が必要である。

まず、偏光ポンピングと呼ばれる原理を用い、荷電励起子(電子1個と励起子1個の結合状態)の偏光特性を利用して初期化を試みた。初期化度は、荷電励起子を生成するレーザーの状態に強く依存し、適切な条件を選択すると高い偏極度(0.8以上)を実現できることが分かった。図1は、単一マクロアトムの荷電励起子 $X^-$ と中性励起子 $X^0$ の発光スペクトルである。2つのスペクトルは偏光の向きが異なるものであり、偏光の向きによって、スペクトルが大きく異なっていることが分かる。これを偏光異方性と呼び、この異方性を利用して初期化に成功した。

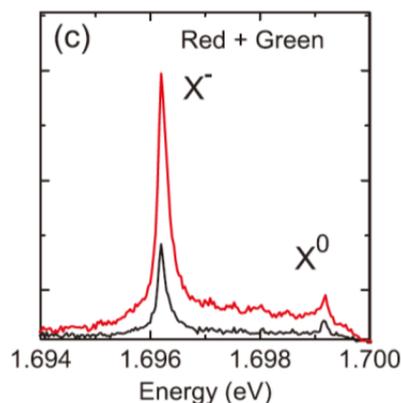


図1 偏光分離した荷電励起子と中性励起子の発光スペクトル。

次に、マクロアトムの荷電励起子における偏光ポンピングを用いた実験結果を理論的に解析した。解析によって、初期化度は、荷電励起子を生成するレーザーのエネルギーおよび偏光状態によって制御可能で、実験では0.9程度の初期化度となっていることを明らかにした。

(2)弾性フォノン波を用いた励起子輸送

マクロアトムのペア間に、弾性フォノン波である表面弾性波を発生させて励起子を輸送し、光学技術によって検出する。

実験では、マクロアトム試料の基本構造である、量子井戸構造に表面弾性波誘起用の電極を作製し、光励起によって励起子を生成して、その輸送を試みた。とくに励起子を構成するスピンのコヒーレンス(干渉度)の評価を行った。スピンのコヒーレンスは、伝搬方

向と弾性波強度に依存することが分かった。これは、スピン方向の操作や、コヒーレンスの制御の実現につながる成果である。

この実験を発展させ、電子の輸送中のスピン回転のイメージングを行った。電子が移動するとスピンの回転を観測した。図2に示すように、外部磁場を印加した実験結果から、電子スピンの軌道相互作用に起因する有効磁場が働いていることを明らかにした。これは、スピン方向の任意操作や、相関測定実現につながる重要な成果である。

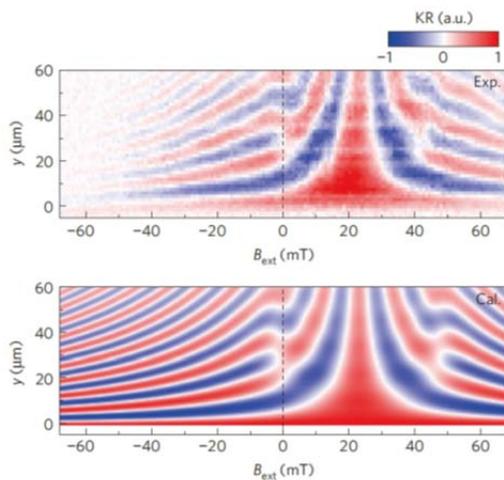


図2 移動電子のスピンイメージング。横軸は外部磁場。上は実験結果、下は理論解析結果。

弾性フォノン波は、マクロアトム電子状態に変化を与えることが予測される。この影響を調べるため、弾性フォノン波のマクロアトム発光特性との関係を明らかにした。実験では、単一マクロアトム試料の表面に金属薄膜を形成し、薄膜に超短光パルスを照射して弾性フォノン波を発生させた。マクロアトムの発光特性は、超短光パルスの強度に強く依存することが分かった。超短光パルスを照射すると、位相の揃った弾性波が発生する。こ

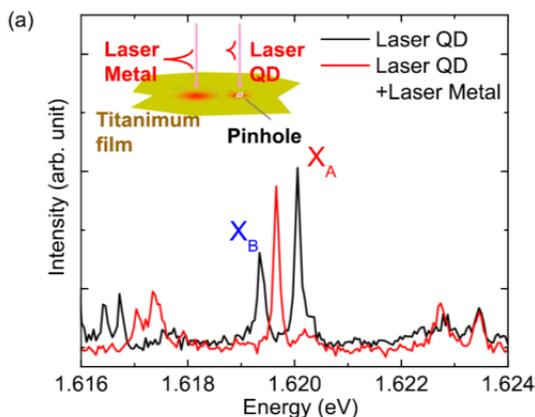


図3 マクロアトムからの発光スペクトルの弾性フォノン波の影響。

の弾性波は試料中を伝搬し、マクロアトム近辺の状態を変化させ、光学特性に反映される。図3はその一例で、マクロアトムの発光特性が、弾性フォノンによって大きく変化している。これは、相関実現に必要な弾性フォノン波を得るための重要な技術になる。

### (3) 高制御性マクロアトム形成

ナノワイヤ技術を用いて、高制御性単一マクロアトムを実現する。高制御性とは、マクロアトムサイズ、形成位置、物性が高度に設計可能なものを指す。まず、ヘテロ界面の急峻性の向上に集中して取り組み、各種作製条件の高度な制御を行い、急峻なヘテロ界面を得るための指針を得た。図4は、作製されたInAs/InPの電子顕微鏡写真である。マクロアトム形成に必要なナノ構造が形成されていることが分かる。

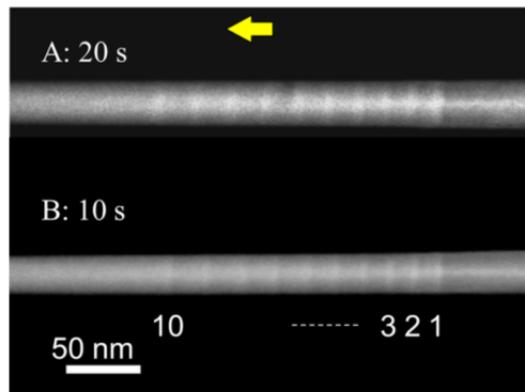


図4 ナノワイヤ中に形成したInP/InAsヘテロ構造の電子顕微鏡写真。

また、ヘテロ構造の高品質化に取り組み、V族成長原料ガスによってヘテロ構造の組成制御性が大きく変化することを明らかにした。図5はナノワイヤを構成するInPの原料ガスをPH<sub>3</sub>とTBPを用いて、InP/InAsヘテロナノワイヤ構造を作製し、作製後のナノワイヤに含まれるAsの量を示したものである。横軸は、ナノワイヤの長さ方向の位置である。図で、横軸200nm程度の位置でのAs濃度を比較すると、TBPを用いたものの方がAsが少なく設計通りのナノワイヤが作製されている。これは、高品質のマクロアトムを実現するための基本技術となる。

以上と並行して、ヘテロ構造の高純度化を目指して、ナノワイヤの形成に必要な触媒を、従来のAuに加えて、ナノワイヤを構成する元素を用いたナノワイヤ作製にも取り組んだ。まず、Inを触媒として、高品質なInAsナノワイヤの成長に成功した。これを発展させて、InPナノワイヤの成長条件を明らかにした。この二つの技術を組み合わせて、InP/InAsのヘテロナノワイヤの作製に世界に先駆けて成功した。これらは、研究目的で

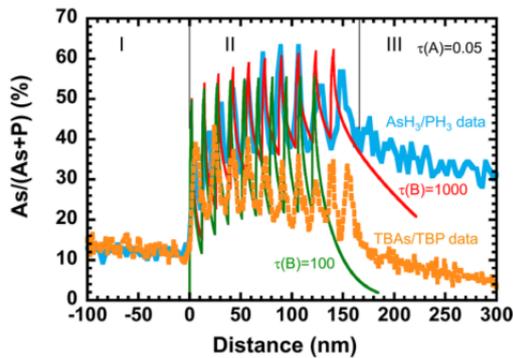


図5 二種類のP原料で作製したInP/InAsヘテロナノワイヤの位置とAs濃度との関係。

ある相関計測に必要な、高い発光効率を有するナノワイヤ実現のための基本技術となる。

以上、3つの要素研究で重要な成果が得られた。今後、このナノワイヤマクロアトムを、圧電結晶の上に配置し、励起子輸送の実験を行う。励起子輸送、各マクロアトムでのスピン初期化および回転、スピンの存在するマクロアトムから励起子輸送、相関形成および観測と進めていく。

以上を進展させ、マクロアトムを多数形成し、励起子の長距離輸送を実現させて、多数の量子ビット間の量子相関を可能とし、固体を用いた量子計算機の実現に貢献する。また、マクロアトム物質の構成技術を確立させ、その光物性および電子物性解明という新しい研究分野、および、構成要素のマクロアトムから設計した人工物質を用いた革新的デバイス応用分野を開拓する。これは、今後も継続して検討し、新規研究課題としての提案も検討する。

## 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10件)

- ① H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, “Modifying exciton optical properties in quantum dots with coherent phonons induced by ultrafast optical pulses” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 103, 112104 (2013)、査読有、(doi:10.1063/1.4821198)
- ② H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, P. V. Santos and T. Sogawa, “Manipulation of mobile spin coherence using magnetic-field-free electron spin resonance”, *Nature Physics*, Vol. 9, pp. 280-283 (2013)、査読有、(doi:10.1038/nphys2573).
- ③ K. Tateno, G. Zhang, H. Gotoh, and T.

Sogawa, “VLS Growth of Alternating InAsP/InP Heterostructure Nanowires for Multiple-Quantum-Dot Structures” *Nano Lett.* Vol. 12, pp. 2888-2893 (2012)、査読有、(doi: 10.1021/nl300482n).

- ④ H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, “Charged exciton creation with two-color optical excitation method and analysis of initialization process of electron spin qubit in quantum dots” *J. Appl. Phys.* Vol. 111, pp. 123520-1-6 (2012) 査読有、(doi: 10.1063/1.4730602).

[学会発表] (計39件)

- ① G. Zhang, D. Birowosuto, K. Tateno, H. Gotoh, and T. Sogawa, “Size-controlled InAs nano-structures in InP NW grown via the Au-free VLS mode”, 8820-22, SPIE Optics + Photonics, San Diego, USA, August (2013).
- ② H. Sanada, Y. Kunihashi, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, P. V. Santos, T. Sogawa, “Magnetic-field-free electron spin resonance in winding GaAs channel”, 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-16), TuIM3, Wroclaw, Poland, July (2013) Invited.
- ③ H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, “Fano Quantum Interference Effects in Exciton-Biexciton Coherently Coupled System in Quantum Dots”, The 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2013), QM3B. 4, San Jose, USA, June (2013).
- ④ H. Gotoh, H. Sanada, H. Yamaguchi, and T. Sogawa, “Modifying Excitonic Properties in Quantum Dots using Coherent Phonons Induced by Ultrafast Optical Pulses” 31st International Conference of the Physics of Semiconductors, 24. 3, Zurich, Switzerland, July (2012).
- ⑤ 眞田治樹、国橋要司、後藤秀樹、小野満恒二、好田誠、新田淳作、Paulo Santos、寒川哲臣「移動スピン共鳴」第61回応物関係連合講演会、18p-E7-2、2014年3月(招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

名称: ナノワイヤの作製方法

発明者: 館野功太、章国強、後藤 秀樹

権利者: 日本電信電話株式会社

種類：特許  
番号：特願 2013-206124  
出願年月日：2013年10月1日  
国内外の別：国内

名称：電子スピン操作素子  
発明者：眞田治樹、後藤 秀樹、寒川哲臣、  
パウロサントス  
権利者：日本電信電話株式会社  
種類：特許  
番号：特願 2013-034618  
出願年月日：2013年2月25日  
国内外の別：国内

名称：スピン装置およびその製造方法  
発明者：眞田治樹、後藤 秀樹、寒川哲臣、  
好田誠、新田淳作、大橋達郎  
権利者：日本電信電話株式会社  
種類：特許  
番号：特願 2012-284410  
出願年月日：2012年12月27日  
国内外の別：国内

○取得状況（計 0件）

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.brl.ntt.co.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 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・主幹研究員  
研究者番号：10393795

### (2) 研究分担者

舘野 功太 (TATENO, Kouta)  
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・主任研究員  
研究者番号：20393796

小野満 恒二 (ONOMITSU, Koji)  
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研  
究所・機能物質科学研究部・主任研究員  
研究者番号：30350466

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・主任研究員  
研究者番号：40393798

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・主任研究員  
研究者番号：50417094

章 国強 (ZHANG, Goquiang)

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・主任研究員  
研究者番号：90402247

寒川 哲臣 (SOGAWA, Tetsuomi)  
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研  
究所・所長  
研究者番号：70211993

### (3) 連携研究者

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・主幹研究員  
研究者番号：6037071