

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02563

研究課題名（和文）永久スピンらせん状態を用いた電子スピンのマクロコヒーレンス実現

研究課題名（英文）Realization of macroscopic coherence of electron spins with persistent spin helix state

研究代表者

国橋 要司（Kunihashi, Yoji）

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員

研究者番号：40728193

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では非磁性半導体中における電子スピンのコヒーレンス増大と効率的な回転制御技術の確立を目的として研究を実施し、GaAs量子井戸中における光誘起ポテンシャルを用いた電子スピン緩和の大幅な抑制、および重元素であるBiを添加したGaAsBi量子井戸における大きなスピン軌道相互作用の増強効果を実証した。本研究課題において達成したGaAsをベースとした電子スピンのコヒーレンス増大と巨大スピン軌道相互作用の導入はスピン自由度を用いた論理素子の実現に向けた大きな一歩である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の遂行によって実証されたGaAs量子井戸中におけるスピンコヒーレンスの増大と巨大スピン軌道相互作用の導入は、いずれも電子スピンを用いた論理素子の実現のためにはなくてはならない要素技術であり、スピンの自由度を活用した画期的なデバイス実現に大きく貢献するものである。一方で長いスピンコヒーレンスや強いスピン軌道相互作用は電子の量子性やトポジカル物性を探索する上で極めて重要なプラットフォームであるため、新奇スピン物性の発見につながる可能性があり学術的にも大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the authors carried out research for the purpose of increasing the coherence of electron spin in non-magnetic semiconductors and establishing an efficient electrical control of electron spin. The authors demonstrated the significant suppression of electron spin relaxation using the photo-induced potential in a GaAs quantum well structure and the enhancement spin-orbit interaction in a GaAsBi quantum well with incorporation of the heavy element Bi. The enhancement of the coherence of GaAs-based electron spins and the introduction of giant spin-orbit interactions achieved in this research subject are major steps toward the realization of logic devices using a spin degree of freedom.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピン軌道相互作用 カー回転 GaAs スピンダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

近年、非磁性体中において電子の有する「スピン」の自由度を積極的に利用することで画期的な次世代デバイスの創生をねらうスピントロニクス分野が注目されている。非磁性体中で電子スピンを情報担体として活用するためにはスピンの方向を局所的、かつ電氣的に制御する必要がある。そのための重要なツールはスピン軌道相互作用によって生じる有効磁場である。この有効磁場は電場中を運動している電子スピンの、相対論的効果によって感じる仮想の磁場であるため、単一の電子スピんに作用していると考えることができる。また、スピン軌道相互作用の起源が電場であることからわかる通り、有効磁場はゲート電圧等の外部電場によって制御可能である。

一方、この有効磁場は電子スピンにとって好ましくない効果ももたらす。それがスピン緩和である。有効磁場の向きは電子の運動量方向に依存しているため、電子散乱が起こるたびに様々な方向の有効磁場が電子スピんに作用しスピン緩和を起す。このスピン緩和機構をディヤコノフ - ペレル機構 (D'yakonov-Perel' mechanism: DP 機構) と呼ぶ。すなわち、非磁性体中における電子スピン利用の可否は、どこまで DP 機構によるスピン緩和を抑制できるか、そしてスピン軌道相互作用の強い材料中においてどれだけ電子スピンを効率的に制御できるかにかかっている。

我々の研究グループでは典型的な III-V 族半導体ヘテロ構造である GaAs 量子井戸を用いて永久スピンらせん状態 (Persistent Spin Helix State: PSH 状態) と呼ばれる、有効磁場が一軸配向した状態を利用したスピン緩和の抑制手法に取り組んでいた。PSH 状態を実現することにより、電子スピンは一軸配向した有効磁場の周りを歳差運動するようになるため、電子スピンの回転制御とスピン緩和の抑制を両立することが可能となる。この手法を用いることで、それまでサブナノ秒にとどまっていた GaAs 量子井戸中のスピン緩和時間を数 ns オーダーに延長し、ドリフト電場によって電子スピンを 100 マイクロメートル以上にわたって輸送することが可能となった。一方で、非磁性体中における更なるスピンコヒーレンスの向上のためには、PSH 状態を用いることだけでは不十分であることも分かってきた。PSH 状態によって抑制できるスピン緩和は電子の運動量に対して線形性を有するスピン軌道相互作用項のみであり、現実の材料中では非線形のスピン軌道相互作用項も無視できないためである。

2. 研究の目的

前述のような経緯から、我々は III-V 族半導体ヘテロ構造中における非線形スピン軌道相互作用項によるスピン緩和の抑制、および効率的なスピン回転制御のための強いスピン軌道相互作用の導入を研究目的とし本研究課題を設定した。これらを同時に実現することができれば、非磁性体中におけるスピンコヒーレンスの飛躍的な向上と、効率的なスピンの回転制御を両立できるため、大規模なスピンコンピューティングの実現が視野に入る。

具体的には (1) 次元閉じ込め効果によるスピン緩和の抑制 と (2) 重元素の導入によるスピン軌道相互作用の増強効果の実証を目的とした。以下では、上記(1)、(2)の目的に対してどのような実験方法でアプローチし、どのような成果が得られたかを述べる。

3. 研究の方法

我々は GaAs 量子井戸中における電子スピンダイナミクスを詳細に計測することで、前述の目的達成を試みた。本研究では分子線エピタキシー法によって成長した GaAs 量子井戸構造を用い、時間・空間分解 Kerr 回転顕微鏡によって温度 $T = 7 \text{ K}$ における量子井戸中の電子スピンダイナミクス計測を行った。パルスレーザーを用いたポンプ・プローブ法による Kerr 回転計測を行うことで、GaAs の有する光学的選択則を利用したスピン偏極電子の生成と検出が可能となり、スピン緩和時間や電子の g 因子などを評価することができる。

本研究では目的(1)の次元閉じ込め効果によるスピン緩和抑制効果を実証するために、GaAs 量子井戸構造を有するエピタキシャルウェハを細線形状に加工し、その中を伝搬する電子スピンのスピン緩和時間の計測を試みた。また、目的(2)の重元素の導入によるスピン軌道相互作用の増強効果を実証するために、少量の Bi 元素を添加した GaAsBi 量子井戸を作製し、その中で電子スピンダイナミクスの評価を行った。

4. 研究成果

(1) 次元閉じ込め効果によるスピン緩和の抑制

有効磁場によって引き起こされるスピン緩和の本質は、有効磁場の方向が電子の運動方向によって変化することにある。従って、電子の運動量そのものを低次元構造によって閉じ込めてしまえば、いかなるスピン軌道相互作用が存在しようともスピン緩和は発生しなくなる。電子の運動量に最も強力な閉じ込め効果を与える量子構造としては量子ドットが思い浮かぶ。一方で、電子スピンを情報担体として活用しようとした場合、電子スピンを空間的に輸送しなくてはならないため量子ドットでは都合が悪い。そこで

我々は当初、準一次元状の細線構造中に電子スピンを閉じ込めることによってスピン緩和の抑制とスピンの回転制御の両立を実現しようとした。ところが、GaAs 量子井戸を細線構造に加工した場合、加工による壁面へのダメージにより非発光再結合が促進され、有意義な光学計測が困難になることが分かった。この非発光再結合過程の影響は、より大きなスピン緩和抑制効果が期待できる細い細線構造で顕著となる。そこで、我々は別の方法で低次元閉じ込め効果を付与することができないか検討し、光励起キャリアによるポテンシャル変調を用いた手法にたどり着いた。

レーザー光線を用いたポンプ・プローブ計測を行うと GaAs 量子井戸のみではなく、より深い位置にある GaAs バッファ層にも同様に光励起キャリアが生成される。通常、量子井戸とバルクではバンドギャップが異なるため、GaAs バッファ層に存在する光励起キャリアは Kerr 回転計測には影響しない。一方、本研究課題を遂行する中で、我々は GaAs 量子井戸と GaAs バッファ層を隔てる AlGaAs 層の膜厚を最適化することによって、GaAs バッファ層中に生成した正孔が GaAs 量子井戸中に遠隔ポテンシャルを生成し、GaAs 量子井戸中の電子スピンをトラップすることを発見した。これはいわば、光学的に生成されたドットとみなすことができる。実際にスピン緩和時間のスポットサイズ依存性を評価すると、スポットサイズが小さくなるにつれて、劇的なスピン緩和時間の増大が観測された[1]。今回我々が実験した最小のスポットサイズ(3 マイクロメートル)ではスピン緩和時間は実に数十ナノ秒まで長くなっていることが示唆される。

今回我々が発見した、光生成ドットによるスピン緩和の抑制手法はリソグラフィや結晶成長等によって生成されたサブミクロンスケールの構造を用いるのとは全く異なり、再構成が可能な静電ポテンシャルを用いている。従って、レーザー照射によりウェハ上に任意の場所でスピン緩和の抑制効果を発現できるうえ、レーザーをスキャンすることで電子スピンの輸送経路を作製できる可能性もある。本成果は素子の作りこみによらない、自由度の高い電子閉じ込め効果を用いるもので、電子スピンの新たな位置制御技術、または長寿命化技術として、スピントランジスタや固体量子計算の要素技術等への応用が期待できる。

(2) 重元素の導入によるスピン軌道相互作用の増強効果

非磁性体中でのスピン応用に欠かせないもう一つの重要な要素は電気的なスピンの回転技術である。スピントロニクス分野において、半導体ヘテロ構造などにおけるポテンシャル非対称性に起因したラシュバ型のスピン軌道相互作用はゲート電圧で制御可能なことから、電子スピンの電場操作に応用できることが知られている。実際に GaAs 量子井戸をはじめとする様々な半導体量子井戸中において、ラシュバ型スピン軌道相互作用の電場制御やそれに伴うスピンの歳差運動制御が実証されている。より効率的な電子スピンの回転制御をねらうには、このラシュバ型スピン軌道相互作用の大きな材料が必要である。

そこで我々は、GaAs 量子井戸にスピン軌道相互作用の強い重元素である Bi を添加することにより、内在的な GaAs のスピン軌道相互作用を大きく増強できないか検討した。実際に、GaAsBi (Bi = 3.9 %) 量子井戸を伝搬する電子スピんに作用する有効磁場を時間分解 Kerr 回転顕微測定により評価したところ、通常の GaAs 量子井戸中よりも約 10 倍程度大きな有効磁場が電子に作用していることが分かった[2]。3.9%という少量の Bi 添加にもかかわらず、極めて大きなスピン軌道相互作用の増強効果が発揮されたことは InGaAs 系や GaAsSb 系においてもみられない効果であり、Bi 元素の有する巨大スピン軌道相互作用の影響であることが理論的な考察より明らかになった。本成果は GaAsBi 系におけるスピン軌道相互作用を世界で初めて定量的に評価したもので、学術的にも大きなインパクトを有する。

本研究課題を通じて達成した GaAs をベースとした電子スピンのコヒーレンス増大と巨大スピン軌道相互作用の導入はスピン自由度を用いた論理素子の実現に向けた大きな一歩である。

[1] H. Sanada, A. M. Stramma, Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, F. Tagarelli, M. Kohda, J. Nitta & T. Sogawa, *Communications Physics* **3**, 11 (2020).

[2] Y. Kunihashi, Y. Shinohara, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, K. Oguri, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta, H. Sanada, *Applied Physics Letters* **122**, 182402 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Y. Kunihashi, Y. Shinohara, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, K. Oguri, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta, H. Sanada	4. 巻 122
2. 論文標題 Bismuth induced enhancement of Rashba spin-orbit interaction in GaAsBi/GaAs heterostructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 182402
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0145496	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 PLJ. Helgers, JAH. Stotz, H. Sanada, Y. Kunihashi, K. Biermann, PV. Santos	4. 巻 13
2. 論文標題 Flying electron spin control gates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5384
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-32807-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Tanaka, Y. Krockenberger, Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Omi, H. Gotoh, K. Oguri	4. 巻 15
2. 論文標題 Thermodynamic constraints and substrate influences on the growth of high-quality Bi ₂ Te ₃ thin films by pulsed laser deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 65502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac6e27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 D. Hatanaka, M. Asano, H. Okamoto, Y. Kunihashi, H. Sanada, and H. Yamaguchi	4. 巻 17
2. 論文標題 On-Chip Coherent Transduction between Magnons and Acoustic Phonons in Cavity Magnomechanics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.17.034024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Kato, H. Mashiko, Y. Kunihashi, H. Omi, H. Gotoh, K. Oguri	4. 巻 28
2. 論文標題 Highly sensitive transient reflection measurement in extreme ultraviolet region for tracking carrier and coherent phonon dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1595-1602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.381585	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Sanada, A. M. Stramma, Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, F. Tagarelli, M. Kohda, J. Nitta, T. Sogawa	4. 巻 3
2. 論文標題 Spin accumulation in photo-induced potential dimples generated in semiconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-020-0280-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Y. Kunihashi, Y. Shinohara, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, K. Oguri, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta, H. Sanada
2. 発表標題 Enhancement of Rashba spin-orbit interaction in GaAsBi thin film
3. 学会等名 EP2DS-25/MSS-21 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sanada, Y. Kunihashi, Y. Shinohara, G. Mariani, H. Gotoh, M. Kohda, J. Nitta
2. 発表標題 Spin state tomography with magneto-optic effect assisted by large hole g-factor in semiconductor two-dimensional systems
3. 学会等名 EP2DS-25/MSS-21 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 国橋 要司, 篠原 康, 長谷川 将, 西中 浩之, 吉本 昌広, 小栗 克弥, 後藤 秀樹, 好田 誠, 新田 淳作, 眞田 治樹
2. 発表標題 GaAsBiエピタキシャル薄膜におけるスピン軌道相互作用パラメータの定量評価
3. 学会等名 第70会応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kunihashi, H. Sanada, Y. Tanaka, K. Oguri, M. Kohda, J. Nitta, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, H. Gotoh
2. 発表標題 Electron spin dynamics induced by spin-orbit effective magnetic field in GaAsBi
3. 学会等名 ICPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Tanaka, Y. Krockenberger, Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Oguri
2. 発表標題 Pulsed laser deposition for high-quality Bi ₂ Te ₃ thin films on (111) BaF ₂ substrate
3. 学会等名 ICPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Sanada, Y. Kunihashi, A. M. Stramma, Y. Tanaka, H. Gotoh, K. Onomitsu, F. Tagarelli, M. Kohda, J. Nitta, T. Tawara, T. Sogawa
2. 発表標題 Long-lived spin dynamics in light-induced confinement potential generated in GaAs quantum wells
3. 学会等名 ICPS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Kunihashi, H. Sanada, Y. Tanaka, K. Oguri, M. Kohda, J. Nitta, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, H. Gotoh
2 . 発表標題 Optical detection of spin-orbit effective magnetic field in GaAsBi epilayer
3 . 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Sanada, K. Onomitsu, K. Oguri, M. Kohda, J. Nitta, H. Gotoh
2 . 発表標題 Persistent spin helix symmetry controlled by in-plane electric field
3 . 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, Y. Kunihashi, K. Oguri, H. Gotoh, Y. Krockenberger
2 . 発表標題 Growth of high-quality Bi ₂ Te ₃ thin films by pulsed laser deposition
3 . 学会等名 EP2DS-24/MSS-20 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Kunihashi, Y. Tanaka, H. Sanada, K. Oguri, M. Kohda, J. Nitta, S. Hasegawa, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, H. Gotoh
2 . 発表標題 Spin Dynamics Induced by In-plane Magnetic Field in GaAsBi
3 . 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, Y. Krockenberger, Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Oguri
2 . 発表標題 Fabrication of Single-Oriented Domains Bi ₂ Te ₃ Thin Films on BaF ₂ Substrates
3 . 学会等名 ISNTT2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Kunihashi, S. Aragaki, Y. Tanaka, H. Sanada, T. Tawara, K. Oguri, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, H. Gotoh
2 . 発表標題 Effect of electronic temperature on spin dynamics for drifting spins
3 . 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, Y. Kunihashi, Y. Krockenberger, H. Sanada, T. Tawara, K. Oguri, H. Gotoh
2 . 発表標題 Investigation on the growth of Bi ₂ Te ₃ thin films on CaF ₂ and BaF ₂ substrates by pulsed laser deposition
3 . 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Tanaka, Y. Kunihashi, Y. Krockenberger, H. Sanada, T. Tawara, K. Oguri
2 . 発表標題 Studies of growth conditions of Bi ₂ Te ₃ on sapphire substrates by pulsed laser deposition
3 . 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4 . 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	後藤 秀樹 (Gotoh Hideki) (10393795)	広島大学・ナノデバイス研究所・教授 (15401)	
研究分担者	小野満 恒二 (Onomitsu Koji) (30350466)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・多元マテリアル創造科学研究部・主任研究員 (92704)	
研究分担者	田中 祐輔 (Tanaka Yusuke) (40787339)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・研究員 (92704)	
研究分担者	真田 治樹 (Sanada Haruki) (50417094)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・特別研究員 (92704)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------