

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月 1日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011年～2012年

課題番号：23656017

研究課題名（和文）分子単結晶へのスピンプンピング

研究課題名（英文）Spin pumping into molecular single crystal

研究代表者：

白石 誠司（SHIRAIISHI MASASHI）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：30397682

研究成果の概要（和文）：一般にスピンプンピングによるスピン注入では電気的なスピン注入で問題となる伝導度ミスマッチ問題を回避できると言われているが、本研究によって必ずしも従来の理解は正しい場合だけではないことが明らかとなった。そこで徐々に伝導度の差がある系を構築するためにまず非縮退 p 型 Si を用いた素子を作製しスピンプンピングによるスピン注入と室温純スピン流輸送に成功させた(Physical Review Letters 誌掲載)。次に更に伝導度を下げた材料としてゼロギャップ半導体である単結晶単層グラフェンを用い同様の実験を行いやはりスピンプンピングと室温純スピン流輸送に成功した (Physical Review B 誌に Rapid Communication として掲載)。上記の成果はいずれも Editor's Suggestion に選定されたほか、日刊工業新聞・読売新聞など多くのメディアで掲載されるなど大きなインパクトを与えることができた。

研究成果の概要（英文）：The spin pumping method was regarded as a potential method to circumvent the conductivity mismatch problem, which becomes a serious obstacle for spin injection in an electrical method. However, this study revealed that this recognition is not always correct. In order to modulate conductivity of a spin channel, non-degenerated p-type Si was selected as a spin channel, and successful spin pumping and transport of pure spin current at room temperature was realized. This study was published in Physical Review Letters. Next, single-layer graphene, which is nano-carbon single crystal and a zero-gap semiconductor, was used as a spin channel. Here again, successful spin pumping and transport of pure spin current at room temperature was realized, the detail of which was published in Physical Review B as Rapid Communications. Both papers were selected as Editor's Suggestion, and the contents of these studies were introduced in Japanese papers, such as the Yomiuri Shinbun and the Nikkan Kogyo Shinbun.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：分子単結晶・スピンプンピング・逆スピホール効果・スピン輸送

1. 研究開始当初の背景

分子スピントロニクスは、現在 beyond CMOS テクノロジーの中でも軸動的な役割

を果たすと大きな期待が寄せられているスピントロニクス領域における、金属・半導体に次ぐ第三の柱として近年大きな注目を集

めている分野である。しかしながら従来の研究の多くは肝心の分子へのスピン注入に十分な信頼性がおけるものではない、という大きな問題点がある。その原因の1つは電気的なスピン注入法に実験手法が限られており、本質的に高抵抗材料である分子材料にその手法を用いる際に伝導度ミスマッチ問題や *spurious* な信号の発生などの様々な問題が生じることにある。この問題を本質的に回避するには分子スピントロニクスで従来用いられてきた電気的手法に頼らず新たなスピン注入手法を確立することが急務であるという発想に至った。

2. 研究の目的

電気的ではないスピン注入法として、磁化ダイナミクスを用いた動力的スピンプンピングを新たに導入し、電流を一切用いることなく分子単結晶へのスピン注入を目指すことを目的とした。また、一連の研究遂行の中で動力的スピンプンピング法を半導体などの伝導度の低い材料系に用いる問題点なども随時明らかにしていくことも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では動力的スピンプンピングなる手法を用いた。スピンプンピングとは強磁性体に静磁場及びマイクロ波を印加し、強磁性共鳴を誘起した状況においてスピン角運動量保存則にもとづき、強制的にスピン角運動量が接合非磁性体にポンプされる現象を言う。ポンプされたスピンは非磁性体に蓄積されるが、非磁性体には電場が印加されておらずまた磁性も有さないため、この2つの条件を満たすために拡散する蓄積スピンに対して反対方向に拡散する反対向きスピンの流れが生まれる。これが純スピン流であり、

非磁性体の純スピン流輸送が実現できる。

純スピン流観測には逆スピンホール効果 (ISHE)を用いる。ISHE とは重い元素で顕著になる効果であり、重い元素の有するスピン軌道相互作用によってスピンの散乱され、電流に変換される効果である。これによって純スピン流を電流に変換し、それを電圧として観測するという手法を用いた。

以下に年度ごとの研究の詳細を記す。

~2011 年度~

分子単結晶へのスピンプンピング実現に向けて金属磁性体と分子単結晶による素子を作製しスピンプンピング実験を行った。その過程で、本手法においても完全に伝導度ミスマッチを回避し切れない場合があることが判明したため、徐々に伝導を下げた材料へのスピンプンピングを段階的に行い、分子へのスピンプンピングを目指すこととした。

~2012 年度~

2011 年度に得られた結果にもとづき、まず非縮退 p 型 Si をスピンチャンネルにした素子を作製しスピンプンピングによるスピン注入及び室温における純スピン流輸送の観測を目指し、次にさらに伝導度を下げたゼロギャップ半導体である単結晶単層グラフェンを分子スピンチャンネルとして用いて同様の実験を行うこととした。

4. 研究成果

~2011 年度~

スピンチャンネルにはペンタセンや Ir(ppy)_3 、ルブレナなど様々な材料を用いてスピンプンピングを試みたが、詳細な解析の結果スピン源を強磁性金属である場合、逆スピンホール効果で純スピン流から変換された電流が強磁性金属にバックフローを起こすこと、さ

らにスピンプンピングに際して強磁性共鳴を誘起させるが、強磁性金属材料が自発的に誘発する逆スピンホール効果がスピンプンピングの障害となることなどが明らかとなってきた (A. Tsukahara, M. Shiraishi et al., submitted to Nature Communications)。そこで伝導度を徐々に下げたスピンチャネル材料を段階的に用意してスピンプンピングを目指すこととした。

~2012 年度~

2011 年度に得られた結果にもとづき、まず非縮退 p 型 Si をスピンチャネルにした素子を作製しスピンプンピングによるスピン注入及び室温における純スピン流輸送の観測を目指し、成功裏に研究を遂行することができた (Phys. Rev. Lett. 2013. Editor's Suggestion 及び Spotighting Exceptional Research に選定)。この実験で得られた知見を活用し、次にさらに伝導度を下げたゼロギャップ半導体である単結晶単層グラフェンを分子スピンチャネルとして用いてスピンプンピングによるスピン注入と純スピン流輸送を室温で実現した (Phys. Rev. B(R) 2013. Editor's Suggestion に選定)。これにより目標としていた分子単結晶へのスピンプンピングにゼロギャップ半導体というエクスキューズはつくが成功することができた。尚、上記の成果は 2013 年 2 月にプレス発表を行い、読売新聞 (全国版科学面)・日刊工業新聞に掲載されたほか、マイナビニュースや Yahoo ニュースにも紹介されるなど、成果の社会還元の意味でも重要な成果となった。

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 2 件)

- 1) Z. Tang, H. Ago, E. Shikoh, Y. Ando, T. Shinjo and M. Shiraishi, "Dynamically-generated pure spin current in graphene", submitted to Phys. Rev. B87, 140401(R) (2013) [Editor's Suggestion].
- 2) E. Shikoh, T. Shinjo, K. Ando, E. Saito and M. Shiraishi, "Spin-pumping-induced spin transport in p-type Si at room temperature", submitted to Phys. Rev. Lett., 110, 127201 (2013) [Editor's Suggestion & Spotighting Exceptional Research].(E. Shikoh と共同筆頭)

他投稿中 1 件 (Nature Communications 誌)

[学会発表]

(計 29 件 招待講演 17 件・一般講演 12 件)

- 1) M. Shiraishi, "Electrical and dynamical spin injection in Si", PASPS (Hakata, Japan, 2012/12).
- 2) M. Shiraishi, "Electrical and dynamical spin injection in Si", CMOS-ET (Vancouver, Canada, 2012/07).
- 3) 白石誠司 "グラフェンへの電氣的・動力的スピン注入"、グラフェンの材料応用にむけた基礎と応用研究会 (2012 年 8 月・筑波大)

など

[その他]

新聞などメディア掲載

1. 日刊工業新聞 2013 年 2 月 14 日「シリコンスピン素子 開発へ一歩」
2. 読売新聞 2013 年 3 月 25 日「スピントロニクス研究熱く」科学面特集記事

その他マイナビニュース・Yahoo ニュースなどに掲載

受賞 1 件

第 2 回 RIEC Award(2012 年 11 月)

6. 研究組織

(1)研究代表者

白石誠司 (SHIRAISHI MASASHI)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号 : 30397682