



Title	Study on dynamical spin injection, transport and conversion in germanium and graphene
Author(s)	Dushenko, Sergey
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/55885">https://doi.org/10.18910/55885</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name (Sergey Dushenko)	
Title	Study on dynamical spin injection, transport and conversion in germanium and graphene (ゲルマニウムとグラフェンにおける動力学的スピノ注入・輸送・変換に関する研究)

## Abstract of Thesis

In this dissertation author focused on the spintronics study of the two elements from Group 14 of periodic table: carbon (C), in the form of graphene, and germanium (Ge). Graphene attracts large attention from spintronics community due to its long spin diffusion length and novel two dimensional structure with massless Dirac fermions, in contrast to usual bulk materials. Ge, on the other hand, has the same crystal structure as silicon, but has mobility ten times higher. While spin transport was established in silicon, non-local spin transport in Ge at room temperature was still unachievable goal for spintronics researchers prior to the author's study.

In introductory Chapter 1 the author gave short overview of the spintronics topics related to the research presented in the dissertation. However, in the beginning of the chapters 2-4 the author shortly reintroduced and discussed situation in the topics directly related to the results presented in the chapters.

In Chapter 2 the author reported the first experimental demonstration of room-temperature spin transport in n-type Ge epilayers grown on a Si(001) substrate. By utilizing spin pumping under ferromagnetic resonance, which inherently endows a spin battery function for semiconductors connected with a ferromagnet, a pure spin current was generated in the n-Ge at room temperature. The pure spin current was detected by using the inverse spin Hall effect of either a Pt or Pd electrode on top of n-Ge. From a theoretical model that included a geometrical contribution the spin diffusion length in n-Ge at room temperature was estimated to be 660 nm. Moreover, the spin relaxation time decreased with increasing temperature, in agreement with a recently proposed theory of donor-driven spin relaxation in multivalley semiconductors.

The small spin-orbit interaction of carbon atoms in graphene promises a long spin diffusion length and potential to create a spin field-effect transistor. However, for this reason, graphene was largely overlooked as a possible spin-charge conversion material. In Chapter 3 the author reported electric gate tuning of the spin-charge conversion voltage signal in a single-layer graphene. Using spin pumping from yttrium iron garnet ferrimagnetic insulator and ionic liquid top gate the author determined that the inverse spin Hall effect is the dominant spin-charge conversion mechanism in a single-layer graphene. From the gate dependence of the electromotive force the author showed dominance of the intrinsic over Rashba spin-orbit interaction, and estimated its strength to be  $\sim 1$  meV: a long-standing question in graphene-related research.

To pursue goal of temperature investigation of the spin-charge conversion in the yttrium iron garnet/single-layer graphene system, the author first studied temperature behavior of the spin pumping. In Chapter 4, the author presented an analysis of yttrium iron garnet-based systems, highly exploited in spin pumping experiments, and demonstrated proper normalization procedure for the inverse spin Hall effect in such systems. The author explained the discrepancy between experiment and theory recently observed in spin pumping experiments. Thus, the author's result finally allowed for quantitative analysis of the inverse spin Hall effect in various yttrium iron garnet-based experiments, including temperature dependent measurements.

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( Sergey Dushenko )		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	浜屋宏平
	副査 教授	鈴木義茂
	副査 教授	中村芳明
	副査 教授	白石誠司 (京都大学大学院工学研究科)

## 論文審査の結果の要旨

本論文はIV族半導体の中でも近年ポストシリコン材料として大きな関心を集めているゲルマニウムとグラフェンを対象として、室温での純スピン流の注入と伝搬、さらにその変換について基礎物性を定量的かつ系統的に評価した論文である。シリコンエレクトロニクスが微細化限界や膨大な熱発生の問題から従来の発展スピードが鈍化することが強く示唆される現在、様々な観点からシリコンエレクトロニクスを凌駕する技術・材料の開発が進められている。ゲルマニウムやグラフェンはシリコンを凌駕する高移動度を示すことが知られており、材料面でポストシリコンの有力な材料である。更にスピントロニクスは、電荷自由度に加えスピン自由度を制御するという特性からエレクトロニクスが抱える廃熱問題や素子の集積化の問題を解決できる有力な候補技術として極めて盛んに研究されている分野である。本論文で研究対象とするゲルマニウム・グラフェンスピントロニクスは、上記の理由から材料・技術両面でポストシリコンエレクトロニクス研究として近年その重要性が広く認識されている興味深い研究領域である。

Dushenko氏による本研究は上述の視点から重要な意義を有するが、特に世界初のゲルマニウムにおける室温スピン伝導の達成、及びグラフェンにおける両極性(ambipolar)スピン変換の実現とその背景学理、更にそのスピン軌道相互作用の定量的評価に関して半導体スピントロニクス領域において世界を牽引する極めて優れた研究であり、大きな意義を有する。本研究により、半導体スピントロニクスはその材料ステージの拡大また新奇物理現象の発見を通じた基盤学理の深まりという点で飛躍的進歩を遂げた。

本論文は4章校正になっており、第1章は序論及びスピントロニクスにおける主要な先行研究の紹介がなされている。また以下の第2～第4章の冒頭でも、各章で記述する研究に直接関係する先行研究が紹介されている。第2章ではSi(001)基板上にエピタキシー成長させたn型ゲルマニウム薄膜における室温スピン輸送の成功が報告、更に結果の詳細が議論され、得られた実験結果からゲルマニウム中のスピン緩和長が室温で660 nmであること、スピン緩和機構が最近のマルチバレー半導体における理論研究とよく一致するドナー由来の散乱であることが明らかとされている。第3章ではグラフェンにおける両極性スピン変換の実現と、グラフェン中のスピン軌道相互作用の精密理解が報告されており、スピン軌道相互作用の大きさが約1 meVであることが明らかになっている。第4章ではグラフェン中のスピン変換の温度依存性を明らかにする観点から必須となるフェリ磁性絶縁体であるイットリウム=鉄=ガーネット(YIG)をスピン源とするスピン変換物性の温度依存性について結果の紹介と背景学理の議論が行われている。

平成28年2月24日に審査担当者とDushenko氏で審査委員会を開催し、Dushenko氏に博士論文の内容に関する説明を行わせた後、質疑・討論及び口頭試問を行った。論文の内容はいづれも世界的にこの分野を開拓・牽引する極めて優れた内容と先進性を有していること、実験及び結果の解析は極めて緻密かつ物理的に優れた内容であること、質疑においてDushenko氏は本分野における十分な物理的知見を有しているだけでなく、広く物性物理学における広範な知識と深い理解を有していることが確認できたことから、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認めるに至った。