

Title	強磁性体/狭ギャップ半導体二次元電子系におけるスピン依存伝導の研究
Author(s)	日高, 志郎
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/12776
Rights	
Description	Supervisor:山田 省二, マテリアルサイエンス研究科, 博士

氏名	日高志郎		
学位の種類	博士(マテリアルサイエンス)		
学位記番号	博材第375号		
学位授与年月日	平成27年3月20日		
論文題目	強磁性体/狭ギャップ半導体二次元電子系におけるスピン依存伝導の研究		
論文審査委員	主査	山田 省二	北陸先端科学技術大学院大学 教授
		鈴木 寿一	同 教授
		水田 博	同 教授
		堀田 将	同 准教授
		土家 琢磨	北海道大学 准教授

論文の内容の要旨

Recently, study of semiconductor spintronics that explore the possibility of new functional devices based on new principles or materials using both the charge and spin in semiconductors has been actively carried out. In particular, spintronics for the nonmagnetic semiconductor (NMS) based materials have attracted much attention owing to their high adaptability to the existing device fabrication techniques. The first proposed active device in NMS-spintronics is Datta-Das type spin field-effect transistor (spin-FET). The most prominent problem in realization of the spin-FET is the high-efficiency electrical spin injection into a two-dimensional electron gas (2DEG) showing strong Rashba spin-orbit coupling (RSOC) from ferromagnetic electrodes. Previously, evaluation of the pure spin injection effect was almost impossible due to the current magnetoresistance effect of ferromagnet (FM) and the very low spin injection efficiency. Thus, detailed knowledge of the behavior of the spin current injected into narrow-gap semiconductor (NGS)-2DEG was not obtained. In this study, investigations comparing the nonlocal spin-valve (NLSV) and weak-antilocalization (WAL) were carried out to obtain the detailed knowledge related to spin transport properties in NGS-2DEG. The NGS-2DEG wafer used in this study is an InGaAs/InAlAs inverted heterostructure with 75 %-In-content. The InGaAs-2DEG channel was

grown on a semi-insulating GaAs(001) substrate via $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.15-0.8$, $\Delta x = 0.05$, 100 nm/step) metamorphic step graded buffer layers by conventional solid-source molecular beam epitaxy. Si delta-doping layer is located at the substrate side from the InGaAs-2DEG channel with no doping nor barrier layers between the surface and the 2DEG interface. Also, since the In content is high, Schottky barrier height is anticipated to be up to ~ 20 meV for realization of a high-efficiency barrierless spin injection. Hall-bar and lateral SV (LSV) devices were fabricated on a single InGaAs-2DEG wafer. The FM electrodes of LSV devices are CoFe alloy, which is expected for high-spin polarization.

First of all, the basic characteristics of InGaAs-2DEG wafer were evaluated using the Hall-bar devices. The 2DEG was confirmed through observation of quantum Hall effect under the high magnetic field region at 1.6 K. As a result of magnetoresistance measurements, negative magnetoresistance at neighborhood of zero magnetic field is observed, i.e., weak-antilocalization. As a result of an analysis using the assumed D'yakonov-Perel' (DP) spin relaxation mechanism for the WAL, RSOC constant showing strength of RSOC is estimated to be $\sim 5.1 \times 10^{-12}$ eV · m. In addition, the spin-orbit relaxation length determined by the RSOC constant and the electron effective mass was estimated to be ~ 0.6 μm .

Next, NLSV characteristics of the LSV device were evaluated at 1.6 K. Hysteresis of the non-local resistance dips was observed in the vicinity of $\sim \pm 40$ mT. In the three-terminal resistance including the FM of magnetoresistance, anisotropic magnetoresistance (AMR) is observed. From the comparison of the NL-resistance and AMR, NL-resistance dips were observed in anti-parallel alignment status of the magnetization of the FM. From the above results, a successful electrical spin injection into an InGaAs-2DEG from FM was confirmed. Additionally, magnitude of the NL-resistance change seems to decay exponentially with

increase in the FM electrode spacing. This is a typical behavior of pure spin currents.

As a result of an analysis using one-dimensional drift-diffusion model, spin diffusion length and spin polarization at CoFe/InGaAs interface were estimated to be $\sim 5.1 \mu\text{m}$ and $\sim 5.7 \%$, respectively. If the spin polarization of the CoFe electrode is assumed to be less than 55 %, spin injection efficiency is estimated to be higher than 11 %. The spin diffusion length and the spin polarization are three times as high as those of the FM/InAs-2DEG system reported by other groups. On the other hand, the ratio of the spin-orbit relaxation length and spin diffusion length is ~ 8.5 . The same physical phenomena is not necessarily observed in both cases, indicating the possibility of different spin relaxation mechanisms.

These results are important findings in realization of the spin-FETs, and therefore, the NMS-spintronics.

Keywords: narrow-gap semiconductor, two-dimensional electron gas, Rashba spin-orbit coupling, nonlocal spin injection

論文審査の結果の要旨

次世代電子デバイス候補の一つである半導体スピndeバイスの研究はここ 20 年来、多様な広がりを見せている。いずれもまだ実用化には距離があるものの、様々な化合物磁性半導体を用いたもの、非磁性半導体ヘテロ接合を用いたもの等様々なデバイスが提案・研究されてきている。その内、後者に属するモデルデバイスとして、20 年以上前に提案された、デバイス内のスピンの制御（3 端子動作）の原理としてスピン軌道相互作用を活用する Datta-Das 型 spin-FET がある。

このデバイスは基本的には極微細の弾道デバイスとして実現する必要がある等の理由で作製が難しく、これまで研究の進行は決して早いとは言えなかった。その中で解決すべき課題の一つは、スピンの情報を保った電子を半導体ヘテロ接合界面に高効率に注入・検出することである。その種の研究は、スピン軌道相互作用の弱いバルク半導体等でこそ取り組みが多いものの、spin-FET の有望材料である InGaAs/InAlAs ヘテロ接合では、スピン緩和が極めて早い等その課題の困難さから、これまで殆ど報告が無いのが現状である。本研究はその課題に精力的に取り組んだものである。

具体的には、CoFe 強磁性体電極/ $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$ 2次元電子ガス複合系を選定して新構造のスピバルブ素子を作製し、スピン情報を純粹に取り出すのに適した非局所測定を系統的に行った。その過程で信号の電極間隔依存性を明確に観測することに成功し、強磁性体/半導体2次元電子ガス間のスピン注入(検出)効率、2次元電子ガス内でのスピン拡散長を精密に評価することに成功した。その結果は、両方の値とも同様に spin-FET をめざす他グループの類似構造での結果と比較して数倍改善されたものであった。これは、適切な磁性体/半導体界面制御により、半導体ヘテロ接合へのスピン注入効率が大きく改善されうること、また強いスピン軌道相互作用があっても長いスピン拡散長が得られ、拡散型 spin-FET も実現しうることを示している。さらに、今後のデバイス開発でキーとなると考えられる、反局在の結果との矛盾や高いスピン注入効率・長い拡散長をもたらす可能性のある諸機構についても詳細に議論した。

以上本論文は、スピン軌道相互作用を動作原理とする spin-FET 実現に向け、新構造によりスピン注入の問題に取り組み種々の新しい知見を得たもので、学術的に貢献するところが大きい。よって博士(マテリアルサイエンス)の学位論文として十分価値あるものと認めた。